



Aalto-yliopisto
Kemiantekniikan korkeakoulu

Anna Koppanen

Nanoselluloosan elinkaarivaikutukset elintarvikepakkauksissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 16.11.2018
Valvoja: Professori Jouni Paltakari
Ohjaaja: Yliopistonlehtori Eero Hiltunen

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Anna Koppanen			
Työn nimi: Nanoselluloosan elinkaari-vaikutukset elintarvikepakkauksissa			
Korkeakoulu: Kemiantekniikan korkeakoulu			
Laitos: Biotuotteiden ja biotekniikan laitos			
Professori: Kuitu- ja polymeeritekniikka		Koodi: CHEM3024	
Työn valvoja: Professori Jouni Paltakari			
Ohjaaja: Yliopistonlehtori Eero Hiltunen			
<p>Diplomityössä selvitettiin kirjallisuuden pohjalta nanoselluloosan käyttöä elintarvikepakkauksissa. Lisäksi selvitettiin sekä ruokapakkausten että pakkaustekniikan nykytilaa ja tulevaisuutta. Nanoselluloosan käytössä keskityttiin sen elinkaaren ympäristövaikutuksiin. Työssä tunnistettiin myös yhteiskunnallisia muutosvoimia, joita ruuantuotantoketjuun kohdistuu ja jotka tulevat todennäköisesti vaikuttamaan elintarvikepakkauksiin kohdistuviin vaatimuksiin. Tärkeiksi kehityskuluiksi tunnistettiin ilmastomuutos, väestönkasvu, kaupungistuminen ja ruuan hinnan nousu sekä teknologiset muutokset elintarvikeketjun kaikilla tasoilla.</p> <p>Työn tuloksena saadaan alustavia viitteitä siitä, että nanoselluloosa saattaa olla myös ympäristön kannalta hyvä vaihtoehto elintarvikepakkausten raaka-aineena korvaamaan öljypohjaisia muoveja. Nanoselluloosan käyttökelpoisuus pitää harkita tapauskohtaisesti ja tuotelähtöisesti. Nanoselluloosalla on pakkaustekniikan kannalta tärkeitä ominaisuuksia, kuten lujuus- ja barrier-ominaisuudet sekä kyky muodostaa kalvoja. Toisaalta sen tuotanto on energiantensiivistä ja valmistukseen voi kulua paljon kemikaaleja. On myös tuloksia, joiden mukaan nanoselluloosan tuotantomittakaavan kasvu vähentää energiantensiivisyyttä. Samoin eräessä tutkimuksessa latexin korvaamisella nanoselluloosalla oli edullisia vaikutuksia pakkauksen ympäristöjalanjälkeen.</p> <p>Elinkaariarvioita ei kuitenkaan ole vielä julkaistu nanoselluloosatuotteiden käyttö- ja loppuvaiheista. Näin ollen työssä ei voitu täysin selvittää nanoselluloosan elinkaaren ympäristövaikutuksista elintarvikepakkauksissa tai antaa suosituksia nanoselluloosan käytöstä. Lisää tutkimusta vaaditaan, jotta voidaan vastata, onko nanoselluloosa raaka-aineena ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin esimerkiksi öljypohjaiset muovit. Näissä tutkimuksissa tulee myös selvittää nanoselluloosan roolia kiertotaloudessa.</p>			
Päivämäärä: 16.11.2018	Kieli: suomi	Sivumäärä: 69 sivua	
Avainsanat: nanoselluloosa, elinkaariarviointi, elintarvikepakkaus, pakkauksen funktiot			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Anna Koppanen			
Title: Life Cycle Impacts of Nanocellulose in Food Packaging			
School: School of Chemical Engineering			
Department: Bioproducts and Biosystems			
Professorship: Fiber and Polymer Engineering		Code: CHEM3024	
Supervisor: Professor Jouni Paltakari			
Instructor: University Lecturer Eero Hiltunen			
<p>The Master's thesis reviewed the life cycle assessments of nanocellulose and its use in food packaging. The report overviews the present state and future of packaging technology and food packaging. The focus in the study of nanocellulose was in the environmental impacts of the life cycle of the product.</p> <p>Several different drivers of change in the society was recognized to effect on the food production chain, which will have an impact on the product requirements in food packaging. Climate change, population growth, urbanization and the increase in the food price were recognized as important drivers along with technological change on all the levels of food production chain.</p> <p>The results of the research give some indication that using nanocellulose as a raw material to replace oil-based plastics might be a good option for food packaging solutions. The use of nanocellulose is always case sensitive and the packaged product is the base for these decisions. Nanocellulose has some key properties that are important to packaging technology. These include strength, barrier and film-forming properties. Production of nanocellulose is energy-intensive and can include the use of large amounts of chemicals. There are results that suggest that the scale-up of the production will decrease the energy-intensity. A study also found that replacing latex with nanocellulose also decreased the environmental footprint in a packaging application.</p> <p>There is no published research on the use and end-of-the-life stages of nanocellulose products. Thus, is was not possible to get full picture of the impacts of nanocellulose in food packaging or give recommendations. More research is needed to conclude if nanocellulose is more environmentally friendly raw material in the packaging solutions than the alternatives. Future research also needs to define the role of nanocellulose in a circular economy.</p>			
Date: 16.11.2018		Language: Finnish	
		Number of pages: 69 pages	
Keywords: nanocellulose, life cycle assessment, food packaging, packaging functions			

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tavoitteet, rajausta ja tutkimuskysymykset.....	2
2	SELLULOOSA.....	4
2.1	Yleistä	4
2.2	Nanoselluloosa.....	5
3	PAKKAAMISEN TRENDIT	11
3.1	Pakkauksen funktiot.....	11
3.1.1	Tuotteen suojaus ja hävikki.....	11
3.1.2	Markkinointi.....	14
3.1.3	Tuotetieto	15
3.1.4	Logistiikka.....	16
3.1.5	Pakkausprosessi.....	20
3.2	Muutokset yhteiskunnassa	21
3.2.1	Yleistä	21
3.2.2	Ilmastomuutos, väestönkasvu ja taloudellinen epätasa-arvo	22
3.2.3	Kaupungistuminen	24

3.2.4	Teknologiset muutokset	25
3.2.5	Yhteiskunnalliset kuluttajat.....	27
3.3	Pakkaamisen ympäristövaikutukset	28
3.3.1	Kestävä kehitys	28
3.4	Nanoselluloosa pakkauksissa.....	29
4	ELINKAARIARVIOINTI	32
4.1	Yleistä	32
4.1.1	Elinkaariarvioinnin historia.....	33
4.2	Määrittelyvaihe	33
4.3	Inventaarioanalyysi	36
4.4	Vaikutusarviointi	36
4.5	Tulosten tulkinta	40
5	Nanoselluloosan elinkaariarviot	44
5.1	Nanoselluloosakomposiittien elinkaariarviot	44
5.2	Nanoselluloosafibrillien elinkaariarviot	45
5.3	Nanoselluloosan tuotannon mittakaava ja elinkaari-vaikutukset	49
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	51
7	YHTEENVETO.....	55

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Maailmassa tapahtuu isoja muutoksia. Ilmastomuutos muokkaa tulevana vuosikymmeninä ruuantuotantoa. Samaan aikaan väestönkasvu lisää ihmisten määrää ja vuosisadan puoleen väliin mennessä maapallolla asuu ennusteiden mukaan 9 miljardia ihmistä. Tämä voi johtaa kehitykseen, jossa kaikkina aikoina ei ehkä ole saatavissa kaikkia elintarvikkeita, joihin olemme tottuneet.

Ruuan markkinahinnat tulevat Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO:n (*Food and Agriculture Organization*) mukaan nousemaan. Samanlaista kehitystä voi tapahtua myös muiden raaka-aineiden osalta. Jos ruoan kysyntä ja hinta kasvaa, ruokahävikin estämisestä ja tehokkaista ruoanjakeluketjuista tulee entistä tärkeämpiä. Jakeluketjuissa on viimeisen 50 vuoden aikana nähty iso muutos, jota kutsutaan globalisaatioksi. Elintarvikkeet ja raaka-aineet kulkevat pitkiä matkoja tuotantopaikoilta vähittäismyyntiin. Ruokapakkausten merkitys näissä olosuhteissa on entistä isompi.

Samalla kun ruokapakkausten kokemat ulkoiset olosuhteet ja vaatimukset ovat kasvaneet, pakkauksia kohtaan on entistä enemmän paineita kuluttajien suunnalta. Roskaantuminen sekä maalla että erityisesti merissä on puhuttanut viime vuosina. Muovituotteita on kielletty Euroopan Unionissa ja on esitetty entistä enemmän vaatimuksia pakkausmuovin rajoittamiseen.

Merten mikromuovi ja valtamerten kelluvat muovista koostuvat jätelautat ovat nousseet esiin uutisissa. Tyynellä merellä kelluvan jätelautan on tutkittu olevan 1,6 miljoonan neliökilometrin laajuinen eli pinta-alaltaan kolmen Ranskan kokoinen ja sisältävän noin 79 000 tonnia muovijätettä. [1]

Kieltojen lisäksi Euroopan Unionissa on harkittu muovin laittamista verolle. Kiinnostus vaihtoehtoihin pakkausmateriaaleihin onkin tällä hetkellä suurta. Katse on käännetty

erityisesti kiertotalouden periaatteita noudattaviin, uusiutuvista lähteistä tuotettuihin ja biohajoaviin materiaaleihin.

Selluloosapohjaiset tuotteet kuten pahvit, kartongit ja paperit ovat jo pitkään olleet yleisiä pakkausmateriaaleja. Aaltopahvi on ollut perinteisesti kaikista käytetyin pakkausmateriaali noin 40 % osuudella kaikkien pakkausmateriaalien massasta. Nopeasti liikkuvissa kulutustuotteissa (FMCG, *Fast Moving Consumer Goods*) sillä on ollut noin merkittävä yli 60 % osuus, mutta osuuden kasvutahti on hidastunut tuoretuotteissa. [2]

Nanoselluloosa on yksi kiinnostava uusi raaka-aine pakkausmateriaaleissa. Nanoselluloosasta puhutaan, kun selluloosakuidut on hajotettu pienemmiksi partikkeleiksi (kuten mikrofibrilleiksi) niin, että kuitujen tai kuitunippujen leveys on nanomittakaavassa eli 1-100 nm. Nanoselluloosalla on paljon ominaisuuksia, jotka ovat pakkausten kannalta merkittäviä. Sillä on suuri vetolujuus, siitä voidaan muodostaa läpinäkyviä kalvoja ja se on kemiallisesti helposti muokattavissa. Materiaalina se on uusiutuvista raaka-aineista tuotettu ja biohajoava. Kaasujen liikkuminen nanoselluloosakalvojen läpi on hidasta.

Vaikka nanomittakaavan selluloosaa eroteltiin ensimmäisen kerran jo 1980-luvulla, materiaalin tuottamisen energiankulutusta pidettiin pitkään liian suurena. Nyt kiinnostus on herännyt uudelleen ja uusilla menetelmillä energiankulutusta on saatu hillittyä. Energiankulutus on silti keskeinen kysymys nanoselluloosan tuotannon ympäristövaikutuksia tarkasteltaessa. Myös erilaisia entsymaattisia ja kemiallisia esikäsittelymenetelmiä on tutkittu ja pyritty hakemaan energiansäästöä ja haluttuja ominaisuuksia niiden kautta.

1.2 Tavoitteet, rajausta ja tutkimuskysymykset

Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään, millaisia muutoksia ruoantuotannossa ja -kulutuksessa on nähtävissä. Miten pakkaustekniikalla voidaan vastata näihin muutospaineisiin ja onko nanoselluloosalla osuus tulevaisuuden tarpeisiin vastatessa. Ei ole järkevää vastata ympäristöongelmaan siirtämällä ongelma toiseen tuotteeseen tai muilla näennäisratkaisuilla. Tutkimuksessa pyritäänkin selvittämään millaisia ovat nanoselluloosan tuotannon elinkaarivaikutukset.

Tutkimuskysymykset:

Millaisia vaatimuksia elintarvikepakkaukset kohtaavat nyt ja tulevaisuudessa?

Voidaanko nanoselluloosalla tehdä elintarvikepakkauksista elinkaarivaikutuksiltaan ympäristöystävällisempiä?

Tutkimus rajataan nanoselluloosan ympäristöystävällisyyden osalta elinkaariarvioihin. Nanoselluloosan ympäristövaikutuksia, myrkyllisyyttä ja biohajoavuutta on myös selvitetty, mutta tutkimukset, joissa ei tarkastella nanoselluloosan koko elinkaarta, rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimus toteutetaan kirjallisuustyönä.

Aluksi luvussa kolme tehdään katsaus selluloosan ja nanoselluloosan eri muotoihin. Luvussa tarkastellaan myös niitä yhteiskunnallisia muutosvoimia, jotka vaikuttavat ruuantuotantoon ja kulutukseen tulevaisuudessa ja pyritään paikantamaan, miten uusiin vaatimuksiin voidaan vastata pakkausteknologialla ja -materiaaleilla. Tehdään katsaus myös pakkausteknologiaan ja niihin fyysisiin ominaisuuksiin ja olosuhteisiin, joihin pakkaukset elinkaarensa aikana joutuvat.

Luvussa neljä käsitellään elinkaariarviointia menetelmänä. Luvussa käydään läpi elinkaariarvioinnin vaiheet. Selvitetään millaista tietoa elinkaariarvioinnissa saadaan ja millaisia rajoitteita menetelmällä on.

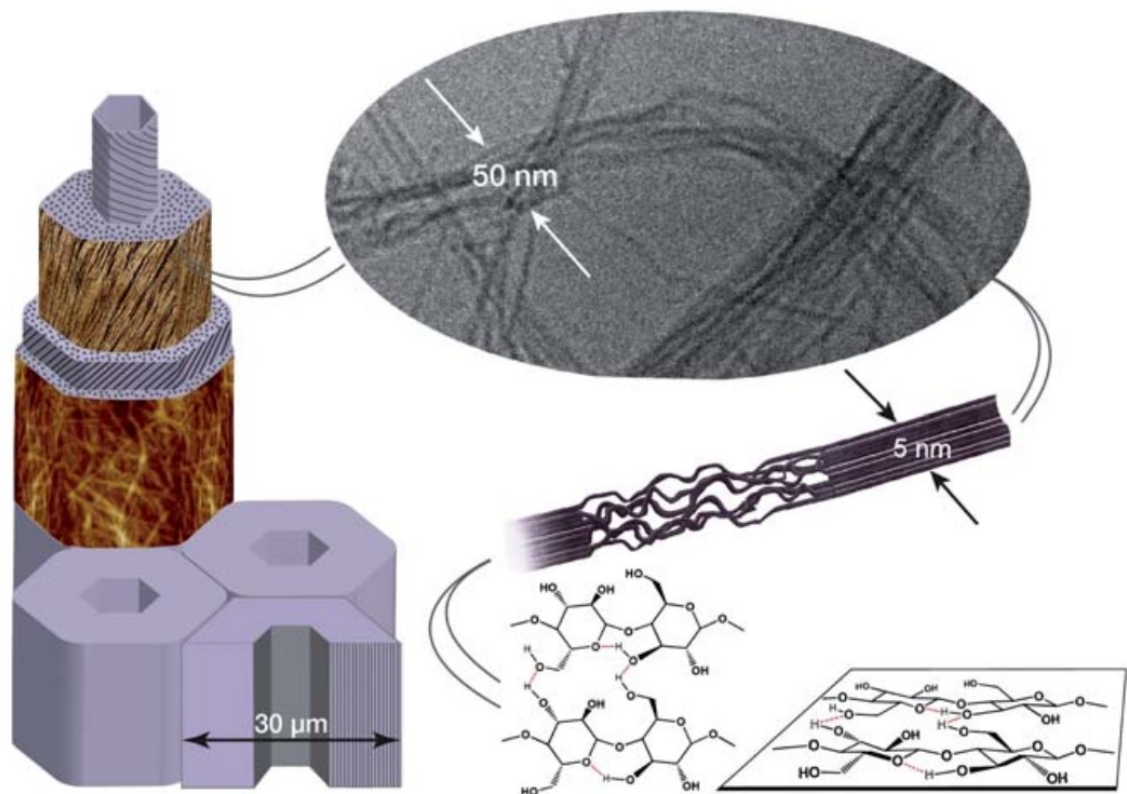
Luku viisi käsittelee nanoselluloosasta tehtyjä elinkaariarvioita. Luvussa tehdään kirjallisuuskatsaus tähän mennessä julkaistuihin elinkaariarvioihin ja niiden tuloksiin. Luku kuusi käsittelee tutkimuksen tuloksista tehtäviä johtopäätöksiä. Viimeisessä luvussa seitsemän tehdään yhteenveto keskeisimmistä tuloksista.

2 SELLULOOSA

2.1 Yleistä

Selluloosa on erittäin yleinen molekyyli luonnossa. Lähes kaikkien kasvien soluseinät koostuvat selluloosasta ja sitä tuottavat myös erilaiset bakteerit ja pieneliöt. Selluloosakuitujen rakenne vaihtelee lähteen mukaan. Bakteerien tuottama selluloosan polymeroitumisaste on korkea ja se on hyvin kiteistä. Kuitenkin suurin osa selluloosaraaka-aineesta lähtöisin eri puulajeista. Lisäksi kasvien rakenteissa vaihtelevat kemialliset ympäristöt, joiden osana selluloosakuitu esiintyy.

Kuva 1 esittää kaaviokuvan selluloosan järjestymistä soluseinämissä kuiduiksi, mikrofibrilleiksi ja selluloosamolekyyleiksi.



Kuva 1 Puun solujen seinämissä on kerrosrakenne. Seinämien kerrosten järjestymissuuntaa on hahmoteltu atomivoimamikroskooppikuvia hyödyntäen. Kuidun seinämien fibrillit koostuvat mikrofibrillikimpuista. Primääriseinässä fibrillit ovat

järjestäytyneet sekaisin. Sekundaariseinämissä fibrillit ovat yhdensuuntaisia, mutta eri kerroksissa fibrillien järjestäytymiskulma muuttuu. Mikrofibrilleissä yhdensuuntaisten selluloosamolekyylien kiteiset ja amorfiset osat vaihtelevat. Selluloosamolekyylit ovat kiinnittyneet toisiinsa vetysidoksin. [3]

2.2 Nanoselluloosa

Nanoselluloosa on selluloosaa, jonka ainakin yksi dimensio mitataan nanometreissä eli on alle 100 nm. Tämä on yleinen määritelmä selluloosan lisäksi muillekin nanomateriaaleille. Euroopan komissio on säätänyt nanomateriaalien käytölle rajoituksia ja sen vuoden 2011 määritelmä nanomateriaalille kuuluu:

”...materiaali sisältäen partikkeleita, joko sitoutumattomina, aggregoituneina tai agglomeraatteina, ja jossa 50 % tai enemmän partikkeleita numeerisesta jakaumasta sisältää partikkeleita, joiden yksi tai useampi dimensio on välillä 1–100 nm.” [4]

Nanoselluloosakuitujen ominaisuudet riippuvat enimmäkseen kahdesta tekijästä:

1. Mistä lähteestä kuidut ovat peräisin eli millainen on ollut kiteisten selluloosamikrofibrillien biosynteesi.
2. Millainen on ollut selluloosapartikkelien erotteluprosessi mikrofibrilleistä. Entsyyttiset ja kemialliset esikäsittelyt edeltävät mekaanista erottelua. Mekaanisia prosessointikeinoja ovat esimerkiksi homogointi, mikrofluidisaatio.

Nanoselluloosa jaetaan yleisesti kolmeen päätyyppiin:

1. Selluloosananofibrillit
2. Nanokiteinen selluloosa
3. Bakteeriselluloosa

Nanofibrillit valmistetaan hajottamalla kasvikuituja - kuten sellukuituja - pienemmiksi kuiduiksi ja muiksi partikkeleiksi. Nanofibrillit ovat eroteltuja kuituja tai kuitunippuja, joissa on mukana selluloosakuidun kiteiset ja amorfiset osat. Niiden valmistamisessa käytetään mekaanisia erottelumenetelmiä sekä entsymaattisia tai kemiallisia esikäsittelyjä. Nanofibrillien pituus on mikrometrien luokkaa ja läpileikkaus 10 – 100 nm. Nanofibrillien muototekijä on siis hyvin suuri.

Mekaanisina erottelumenetelminä käytetään esimerkiksi fluidisaattoreita ja jauhimia. Mekaanisilla menetelmillä erotellun nanoselluloosan fibrillaatioaste vaihtelee ja aine on koostumukseltaan hyvin heterogeenistä. Myös nimeämiskäytännöt vaihtelevat ja nanofibrillejä, nanokuituja ja mikrofibrilloitua selluloosaa käytetään lähes synonyymeina.

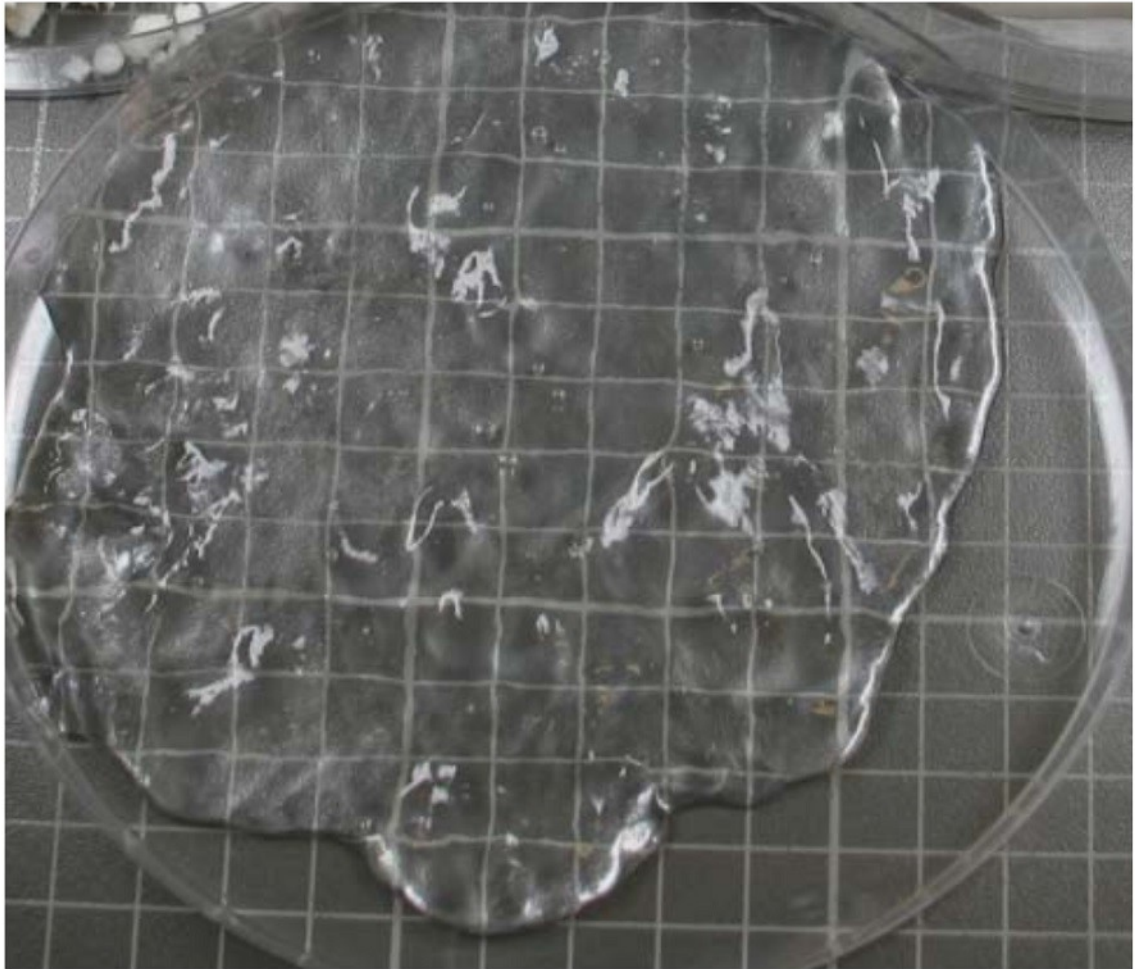
Kuva 2 esittää mekaanisesti fluidisoimalla lehtipuusulfaattisellusta valmistettua nanoselluloosageeliä. Kuitujen leveys on suurempi ilman entsymaattista tai kemiallista esikäsittelyä, yleensä noin 20 – 40 nm. Mekaanisesti valmistetut nanofibrillit ovat voimakkaasti haaroittuneita ja taipuisia. Pinnan hydroksyyliyhymien vuoksi niillä on voimakas taipumus aggregoitua. [5]



Kuva 2 Mekaanisesti fluidisoimalla eroteltu nanoselluloosageeli on läpinäkyvää. Raaka-aineena on käytetty lehtipuusta valmistettua sulfaattisellua. [6]

Ennen mekaanista erottelua voidaan käyttää erilaisia entsymaattisia ja kemiallisia esikäsittelyitä muuttamaan selluloosakuitujen pintakemialla. Kemiallisissa käsittelyissä kuitujen läpimitta yleensä pienenee ja pinnan varaustila muuttuu. Kemiallisia käsittelyitä ovat esimerkiksi karboksimeetylointi ja TEMPO- eli (2,2,6,6-tetrametyyli-piperidin-1-yyli)oksyli-hapetus. TEMPO-hapetuksella selluloosakuitujen pinnan hydroksyyli-ryhmät hapetetaan karboksyyli-ryhmiksi. Näin kuidut erottuvat paremmin toisistaan ja kuitujen läpimitta pienenee. Tuloksena on läpinäkyvä geeli, josta voidaan valmistaa läpinäkyviä

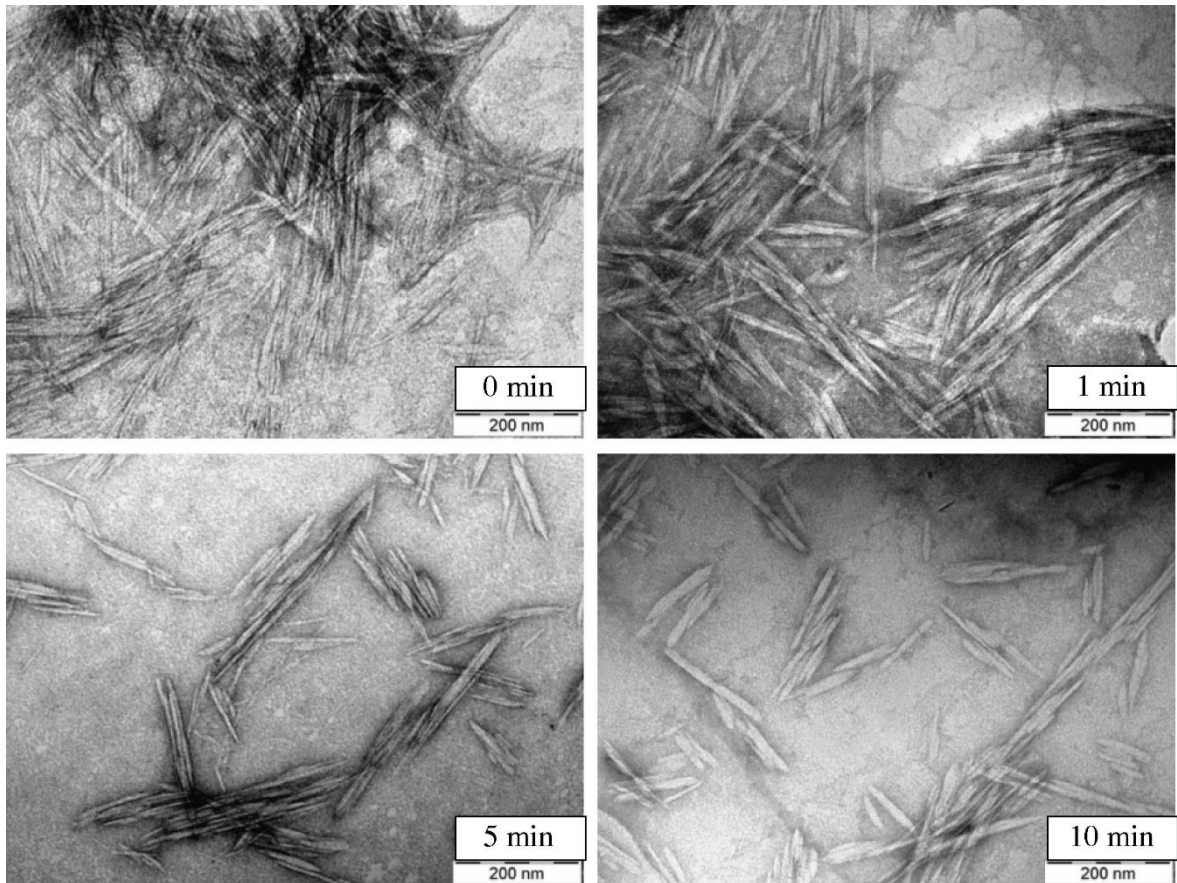
kalvoja. Kuva 3 esittää TEMPO-hapetuksella lehtipuusulfaattisellusta valmistettua nanoselluloosageeliä.



Kuva 3 TEMPO-hapettamalla esikäsitelty nanoselluloosageeli on läpinäkyvää. [6]

Nanokiteinen selluloosa valmistetaan happohydrolyysillä. Tyypillisesti käytetään rikkihappoa. Selluloosakuitujen amorfiset osat hajoavat ja kuitu katkeaa amorfisen osan kohdalta. Tämän jälkeen kiteet hajotetaan mekaanisella menetelmällä, esimerkiksi ultraäänellä tai sonikoimalla. Syntyy sauvamaisia kiteitä. Kiteiden pituus leveys on 2-20 nm ja pituus 100 – 1000 nm. Suurin osa amorfisesta selluloosasta hajoaa, joten selluloosananokiteet eivät ole myöskään taipuisia tai haaroittuneita kuten nanofibrillit. Muototekijä on siis suuri, mutta ei yhtä suuri kuin selluloosananofibrilleillä. Kuva 4 esittää puuvillasta tuotettuja selluloosananokiteitä, jota on sonikoitu 0 – 10 minuuttia. [7]

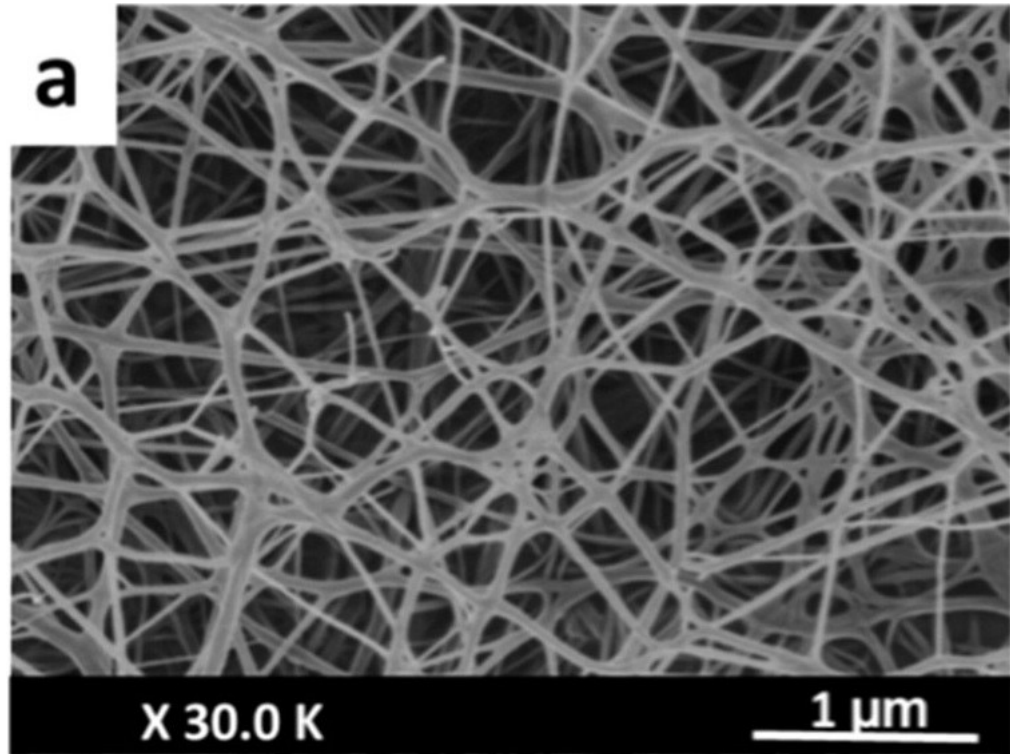
Selluloosananokiteiden pintakemiaan voidaan vaikuttaa valmistustavalla ja sitä voidaan myös muokata. Tämä vaikuttaa kiteiden käyttäytymiseen vesiliuoksessa ja toisaalta sitoutumiseen esimerkiksi komposiittimateriaaleissa. Muodostuvien sidosten vahvuus vaikuttaa myös materiaalin vahvuuteen.



Kuva 4 20 000 kertaisia läpäisyelektronimikroskooppikuvia (Transmission Electron Microscope, TEM) nanokiteisestä selluloosasta vesiliuoksessa. Raaka-aineena on ollut puuvilla. Kuvan rikkihappohydrolyysillä valmistettua nanokiteistä selluloosaa on sonikoitu eri aikoja (0 min, 1 min, 5 min ja 10 min) 20 kHz ja 60 % amplitudilla. [7]

Bakteeriselluloosaa valmistavat erilaiset bakteerit. Raaka-aineena on glukoosi, jota bakteerit polymeroivat. Kun muiden nanoselluloosan valmistusprosessien tavoite on hajottaa raaka-aine pienemmäksi, bakteeriselluloosan tuotannossa bakteerit yhdistävät raaka-aineen glukoosiyksiköt suuremmiksi selluloosamolekyyleiksi. Tuotettu selluloosa on hyvin puhdasta. Sillä on korkea moolimassa ja kiteisyys. Selluloosaa tuottavia bakteerisukuja on useita, esimerkiksi *Gluconacetobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Rhodobacter* ja *Sarcina*.

Bakteeriselluloosa voidaan jo valmistusvaiheessa kasvattaa haluttuun muotoon. Kuva 5 esittää *Gluconacetobacter xylinus* tuottamaa ja elektronimikroskoopilla kuvattua bakteeriselluloosaa.



Kuva 5 Elektronimikroskoopilla on kuvattu bakteeriselluloosan kolmiulotteinen rakenne. Kuvan selluloosakuitujen keskimääräinen leveys on $39,1 \pm 9,3$ nm. [8]

3 PAKKAAMISEN TRENDIT

3.1 Pakkauksen funktiot

Pakkaus ei ole olemassa itsensä vuoksi, vaan se on aina tuotteen yhteydessä palvelemassa erilaisia tehtäviä. Pakkauksen tehtäviä voidaan kutsua funktioiksi. Paine on yhtenä ensimmäisistä määritellyt pakkauksen funktioiksi sisällön säilyttämisen, suojauksen, käyttömukavuuden ja tiedonvälityksen [9]. Emblem lisää listaan vielä säilömistä, tunnistamista, houkuttavuuden [10]. Erilaisia määritelmiä funktioiksi on kirjallisuudessa paljon.

Pakkauksen funktioista on paljon erilaisia jaotteluita. Lindh et al. ovat kokooma-artikkelissaan käyneet funktioita läpi ja on päättynyt jakamaan funktiot kolmeen ryhmään: suojeleminen, käsittelyssä auttaminen ja tiedonvälitys [11]. Lindhin et al. mukaan sisällön säilyttäminen ei ole pakkauksen funktio, koska se kuuluu pakkauksen määritelmään. Seuraavien alalukujen jako ei pohjaa suoraan mihinkään kirjallisuudessa esitettyyn jakoon, vaan on yhdistelmä eri lähteistä. On selvää, että pakkauksen erilaiset tehtävät tukevat toisiaan ja ryhmittelyissä syntyy näin ollen toisensa leikkaavia joukkoja. Esimerkiksi pakkauksen välittämä tieto on välttämätöntä pakkauksen käsittelyn kannalta.

Pakkaukset jaetaan kolmeen tasoon käyttötarkoituksensa mukaan. Primääripakkaus sisältää itse tuotteen ja kuluttaja vie sen kaupasta kotiin ostaessaan tuotteen. Sekundaaripakkaus sisältää useita primääripakkauksia. Sekundaaripakkausta vähittäiskauppa voi käyttää apuna esimerkiksi hyllyjen täyttämiseksi ja esillepanossa. Tertiäripakkaus sisältää useita primääri- tai sekundaaripakkauksia lastattuna esimerkiksi kuormalavalle. Tyypillisiä tertiäripakkauksen materiaaleja ovat esimerkiksi muovikelmut ja kiristysverkot tai -nauhat. [2]

3.1.1 Tuotteen suojaus ja hävikki

Hävikin määrä ruuan jakeluketjuissa vaihtelee. Globaalin etelän maissa jakeluketjussa tapahtuvan hävikin osuus tuotetusta ruuasta arvioidaan olevan 40 - 60 %. Länsi-Euroopassa

hävikki on noin 3 %. [12] Käytän opinnäytetyössä käsitettä ”globaali etelä”, koskemaan yleensä lähellä päiväntasaajaa sijaitsevia lyhyemmän teollistumisen historian ja usein myös siirtomaahistorian omaavista maista. Aiemmin käytössä olleita termejä ovat esimerkiksi kolmas maailma ja kehitysmaat. Lähdeaineistossani usein käytetty, ja edellisessäkin viitteessä esiintynyt, kehitys-diskurssi on kiistanalainen ja tiettyä arvomaailmaa edustava. ”Globaali etelä” on vakiintunut kansainvälisessä politiikassa ja yhteiskuntatieteissä. [13, 14]

Asianmukainen ruokapakkaus vähentää hävikkiä. Jakeluketjussa tapahtuvaa hävikkiä voidaan usein vähentää lisäämällä pakkausmateriaalin käyttöä. Kuitenkin samaan aikaan monilla yrityksillä on ympäristöohjelmien kautta tavoite vähentää pakkausmateriaalin käyttöä. Lisäksi pakkausmateriaali on kustannuskysymys.

Kun tarkastellaan optimaalista pakkausta, päädytään usein tilanteeseen, jossa tavoitteet ovat linkittyneitä ja välillä ristiriidassa toistensa kanssa. Esimerkiksi kuljetuskustannusten minimointi voi olla ristiriidassa tuotteen suojauksen ja kuljetuksessa tapahtuvan hävikin minimoimisen kanssa. Lisäksi ei ole selvää, mikä arvotetaan tavoitetilanteeksi. Onko esimerkiksi kustannussäästö tärkein mittari vai pitäisikö ruokahävikkiä sosiaalisista syistä välttää kaikissa tilanteissa maailmassa, jossa edelleen esiintyy aliravitsemusta.

Jakeluketjun kannalta riittävää pakkaamista ei ole helppo selvittää, jos jakeluketjussa tapahtuneita ongelmia ei selvitetä teknisesti. Usein ilman lähempää tarkastelua voidaan saada selville erilaisia riittäviä pakkaustapoja, mutta täten voidaan päätyä ylipakkaamiseen. Ilman jakeluketjussa kohdattujen ongelmien teknistä selvitystä ei voida saada pakkaus spesifikaatioihin tietoja niistä kriittisistä ominaisuuksista tai siitä ympäristöstä, joiden vuoksi pakattu tuote on kärsinyt vahinkoja. [15]

Huonosti suunniteltu pakkaus lisää todennäköisyyttä, että tuotteeseen kohdistuu seuraavia ongelmia:

- vahinkoja kuljetuksessa
- tuotteeseen pääsee haitallisia aineita, mikrobeja ja tuholaisia vuotojen kautta

- pilaantumista
- tuotetta ei tunnisteta tai se tunnistetaan väärin jakeluketjussa
- ulkonäkö kärsii liikaa ja tuote ei mene enää kaupaksi
- myyntiaika lyhenee. [15]

Tuotteen suojauksessa tärkeitä ovat pakkauksen ja pakkausmateriaalin fyysiset ominaisuudet, vetolujuus, iskunkestävyys. Pakkauksen fyysisen rikkoutumisen lisäksi tärkeää on millaiset ovat rikkoutumattoman pakkauksen suojausominaisuudet, eli miten pakkausmateriaali läpäisee nesteitä ja kaasuja. Eri tuotteet tarvitsevat säilyäkseen erilaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi juuttisäkkejä käytetään joidenkin maataloustuotteiden pakkaamiseen juuri hengittävyytensä vuoksi.

Tuotteen suojauksessa pitäisi ottaa huomioon koko elinkaaren olosuhteet. Pakkaukselta vaaditaan erilaisia suojausominaisuuksia tuotteen valmistuksen ja pakkaamisen aikana kuin kuljetuksessa tai kaupan hyllyssä.

Pakkauksen suojausfunktiot on joskus jaettu aktiiviseen ja passiiviseen. [16] Passiivinen pakkaus on inertti. Aktiivinen pakkaus reagoi ympäristön tai tuotteen ominaisuuksiin säilytyksen aikana ja esimerkiksi parantaa tuotteen säilymistä tai ilmaisee muutoksia olosuhteissa. Jako on kuitenkin hieman vanhentunut, koska teknologiat ovat lyöneet itsensä läpi tuotteissa, joissa niistä on hyötyä. Raja-aktiivisen ja passiivisen välillä on häilyvä.

Ruokapakkausten hävikissä näpistely on myös merkittävä tekijä erityisesti vähittäiskauppioiden kannalta. Pakkaus voidaan suunnitella vaikeasti näpistettäväksi esimerkiksi koon tai muodon puolesta. Lisäksi ruokapakkauksessa on tyypillisiä erilaiset pakkaustavat, joista voi havaita, että pakkaukseen on kajottu jossain jakeluvaiheessa. Tällaisia ovat esimerkiksi korkkien irtoavat reunanauhat tai ylös pullahtavat kannet purkeissa. Myös tuoteväärennöksiä esiintyy elintarvikkeissa, erityisesti kalliimmissa tuoteryhmissä kuten oliiviöljyt tai kokolihatuotteet. [17]

3.1.2 Markkinointi

Koska suurin osa ruuasta myydään kuluttajille nykyään supermarketeissa, pakkauksella on suuri merkitys tuotteen myynnin kannalta. Koska henkilöstöä ei juurikaan ole kertomassa tuotteista, pakkaus myy itsensä. Pakkauksen väreillä, koolla, muodolla, fonteilla ja grafiikalla luodaan tuotteesta mielikuva ja tunnistettavuus. Usein tunnistettavuutta lisätään toistamalla samoja elementtejä mainoskampanjoissa. [18]

Pakkauksen visuaalisen ilmeen taustalla on monia tekijöitä. Yksi keskeinen käsite on tuotebrändi. Brändi koostuu tuotteesta itsestään, tuotteen nimestä, tavoista esitellä ja mainostaa tuotetta sekä tuotteen myynnistä ja jakelusta. [18] Brändeillä katsotaan olevan aineetonta arvoa. Kuva 6 vahvan ja pitkäikäisen brändin The Campbell Soup Companyn vegaanisten tomaattikeittojen pakkauksia.



Kuva 6 The Campbell Soup Companyn brändi on tunnettu. Kaupalliset brändit ovat viime vuosikymmeninä päätyneet myös kulttuurin ja taiteen elementeiksi. Campbell's-tölkki on tunnettu pop-taiteilija Andy Warholin taiteesta. Yhtiö on käyttänyt tätä hyväkseen ja julkaissut puolestaan rajoitettuja eriä Warholin teoksista inspiraationsa saaneita tölkkejä. Kuvassa Campbell'sin vegaanisia tomaattikeittoja. [19, 20]

Kun uutta tuotetta aletaan suunnitella, lähdetään liikkeelle markkinoilla esiintyvistä tarpeista. Tätä kautta täsmentyy myös tuotteen kohderyhmä. Kun kohderyhmä on tiedossa, edetään tuotebrändiin ja niihin tekijöihin, joita tuotteesta halutaan kohderyhmälle viestiä. Tämä ohjaa myös pakkauksen suunnittelua, joka on keskeinen elementti kokonaisviestinnässä. [18]

Ruokapakkaus päättyy yleensä supermarkettiin, jossa on hyllyissä kymmeniätuhansia nimikkeitä. Tyypillisesti ostaja käyttää valinnan tekemiseen hyllyn luona maksimissaan kuusi sekuntia. Kuluttajan huomio pyritään kiinnittämään visuaalisilla elementeillä. Pakkauksen väri erottuu kymmenen metrin päähän, pakkauksen muoto neljän metrin ja brändin logo noin metrin päähän. Ruokabrändi on arvokas. Brändin omistajalle on tärkeää, että kaikki brändiin liittyvä viestintä tukee toisiaan ja säilyttää tai lisää brändiin liitettyä arvoa. [18]

Toisaalta pakkaussuunnittelussa on tärkeää tiedostaa tuotteen kohderyhmä ja segmentti. Jos tuote kilpailee edullisuudellaan, pakkaukseen ja sen suunnitteluun ei tyypillisesti voida käyttää paljon rahaa, koska voittomarginaali on yleensä pienempi kuin korkean hintaluokan tuotteissa. Korkeassa hintaluokassa laatu näkyy myös pakkausvalinnoissa. [18]

3.1.3 Tuotetieto

Pakkauksen pitää tarjota monenlaista tietoa tuotteesta. Eri jakeluketjun vaiheissa tarvitaan erilaista tietoa. Esimerkiksi viivakoodit ja QR-koodit ovat ensisijaisesti kaupan ja logistiikan käytössä. Sekundaariseen pakkaukseen painetaan erilaista tietoa kuin primääripakkaukseen.

Laki säätelee myös sitä, mitä elintarvikkeesta tulee kertoa pakkauksessa kuluttajalle. Pakkausmerkinnöistä tulee ilmetä tuotteen nimi, säilytys- ja käyttötapa (jos se ei ole ilmeinen) massa tai tilavuus, valmistajan tai myyjän nimi ja osoite, viimeinen käyttöpäivämäärä, valmistusaineet, eränumero ja kaikki tarpeelliset varoitukset. [10] Varoituksissa suositellaan kuvien käyttöä. Pakkauksesta kuluttaja saa usein tietoa myös ravintosisällöstä ja niistä aineista, joita kuluttaja mahdollisesti haluaa välttää. Pakkausmerkinnät on jaettu yleisiin ja erityisiin merkintöihin. Yleiset merkinnät tulee

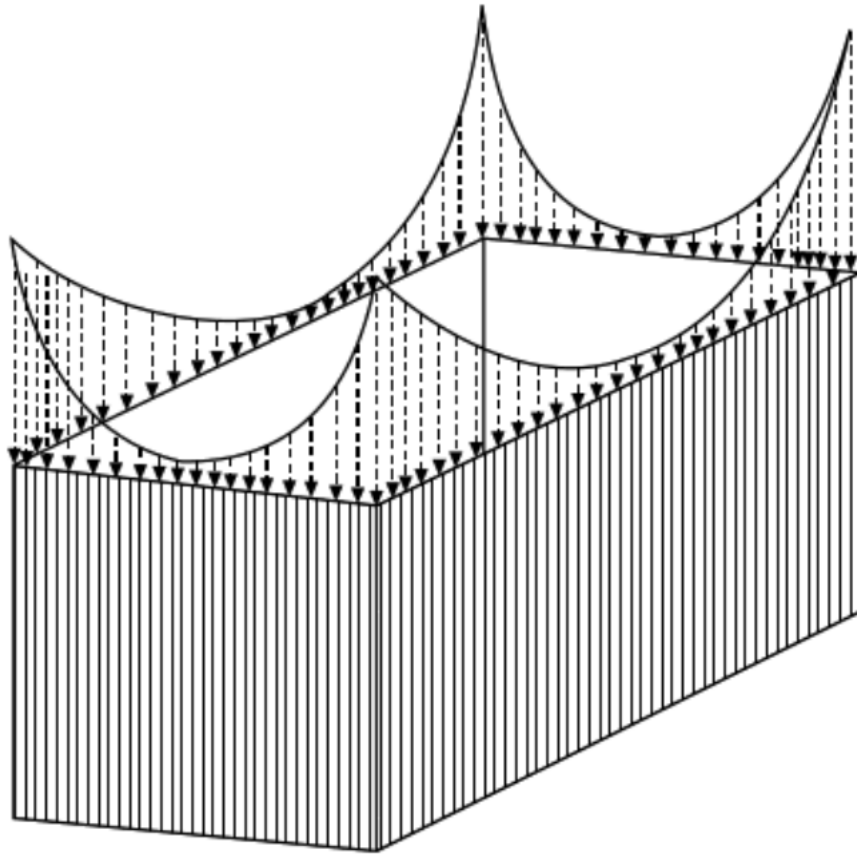
merkitä kaikkiin elintarvikepakkauksiin. Erityiset merkinnät koskevat vain tiettyjä elintarvikkeita ja elintarvikeryhmiä ja niistä on säädetty erikseen. [21]

Pakkausmerkinnöistä on säädetty sekä kansallisella että Euroopan Unionin tasolla. Säädöksissä säädetään muun muassa pakkausmerkintöjen luettavuudesta, sijoittelusta, kielestä, käytettävistä yksiköistä ja symboleista.

Kuluttajalla usein tärkeää tuotetietoa tarjoaa myös mahdollisuus nähdä tai tunnustella tuotetta. Läpinäkyvät pakkauksen osat ja esimerkiksi joustavat muovit voivat tuoda kuluttajalle mahdollisuuden aistinvaraiseen havainnointiin säilyttäen tuotteen silti myyntikunnossa.

3.1.4 Logistiikka

Pakatut tuotteet kärsivät eniten vahinkoja varastoinnin ja kuljetuksen aikana. Pakkaus voi altistua pudotuksille, tärähdyksille, tärinälle, puristukselle ja lävistäville voimille. Mekaanisten rasitusten lisäksi pakkaus voi altistua myös valolle. Hyvä pakkaus kestää näitä jonkin verran. Pakkauksen kestävyys voidaan vaikuttaa sekä materiaalivalinnoilla että pakkauksen suunnittelulla. Kuva 7 esittää laatikon ulkoreunan kantokyvyn jakaumaa. Riippuen materiaalista lämpötilalla ja kosteudella voi olla suuria vaikutuksia pakkauksen lujuusominaisuuksiin.



Kuva 7 Laatikon ulkoreunan kantokyky jakautuu niin, että nurkkien kantokyky on suurin. [10]

Pakkauksen fyysisten ominaisuuksien parantamisella on kuitenkin rajoittavia tekijöitä kuten kokonaistaloudellisuus. Yleensä lisäämällä materiaalinkäyttöä pakkauksessa voidaan parantaa lujuusominaisuuksia, mutta toisaalta tämä lisää materiaalikustannuksia läpi koko pakkauksen elinkaaren ja toisaalta yleensä myös kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksia. Lähes aina pakkausmateriaalin lisääminen kannattaa taloudellisesti, jos sillä voidaan vähentää tuotehävikkiä. Joskus parhaat vaikutukset pakkausten kestävyYTEEN saadaan kouluttamalla varastotyöntekijöitä pakkauksen lujuusominaisuuksien parantamisen sijaan. [10]

Tuotteen suojaaminen ei välttämättä ole riittävää. Jos pakkaukseen kuljetuksen aikana aiheutetut kolhut saavat pakkauksen näyttämään rumalta tai kärsineeltä, se voi jäädä ostajalta hyllyyn. Siispä erilaiset pinnan naarmut, repeytymät, painumat ja haalistumat voivat aiheuttaa hävikkiä. Niitä voi tulla myös muovi ja lasipakkauksiin sekä etiketteihin.

Riittävän suojauksen pitäisi aina lähteä siitä, mikä tuote on kyseessä. Mikä on tuotteen fyysinen olemus, millaisia olosuhteita se kestää ja missä se vaurioituu? Millainen haitta on kyseiselle tuotteelle? Mikä on tuotteen arvo? [10]

Wikström et al. [22] ovat selvittäneet miten ruokapakkauksilla voitaisiin vastata YK:n Agenda2030 - kestävä kehityksen tavoitteeseen 12.3 ”Puolittaa vuoteen 2030 mennessä maailmanlaajuinen ruokajätteen määrä jälleenmyyjä- ja kuluttajatasolla sekä vähentää ruokahävikkiä tuotanto- ja jakeluketjuissa sadonkorjuun jälkeinen hävikki mukaan lukien.” [23] Selvityksen mukaansa ruokapakkauksilla voi olla tavoitteeseen pääsemiseksi suuri vaikutus. Riippuu kuitenkin paljon tuotteesta, mikä on tuotteen ympäristöjalanjäljen ja pakkauksen ympäristöjalanjäljen suhde.

Heller et al. [24] laskivat pakkauksen kasvihuonekaasupäästöjen suhdetta tuotteen tuotannon päästöihin ja saivat tulokseksi, että suhdeluvut vaihtelevat viinin 0,06:sta naudanlihan 780:een. Suhdelukuja voidaan käyttää apuna pakkausten kehittämiseen. Erityisesti vilja- ja maitotuotteiden, kalan ja lihan suhdeluvut olivat suuria ja näissä tuoteryhmissä onkin potentiaalia ruokahävikin ehkäisyyn pakkaustekniikan keinoin.

Tuotteen kuljetuksenaikaiseen kestävyYTEEN vaikuttaa sekä tuote itsessään että pakkaus kokonaisuudessaan. Pakkauskokonaisuuteen kuuluvat kaikki osat primääripakkauksesta tertiääripakkaukseen. Niiden pitäisi yhdessä kestää todennäköiset riskit, mitä jakeluketjussa ilmenee. Pidentyneet jakeluketjut, joissa tuote on pidempiä aikoja tuottajan välittömän vaikutuspiirin ulottumattomissa, ovat tuoneet pakkauksille lisävaatimuksia. Tuotteet voivat altistua suurillekin ilmasto-olojen vaihteluille jakeluketjun aikana. Valintojen ja ratkaisujen testaus ja monitorointi on tärkeää.

Tärähdykset kuljetusketjussa tapahtuvat usein, kun tuotteita liikutellaan käsin ja ne pudotetaan. Siksi painavat pakkaukset ja lavat eivät juuri joudu kestäämään niin paljon iskuja. On tärkeää määritellä pakkauksen tyypillinen putoamiskorkeus, jotta pakkaus voidaan suunnitella suojaamaan tuotetta parhaalla mahdollisella tavalla. [25] Toinen yleinen tapa tärähdyksille on erilaiset kuljetuslinjat laitoksissa. Putoamisessa voiman suunta vertikaalinen ja kuljetuslinjojen ja siirtymien kohdalla yleensä horisontaalinen ja tämä kannattaa huomioida pakkaussuunnittelussa. [25]

Tärähdyksiä ja iskuja vastaan voi pakkauksessa suojautua pehmusteilla. Mitä kimmoisammasta materiaalista pehmuste on, sitä paremmin se suojaa tärähdyksiltä. Toinen keskeinen keino on vähentää käsin tapahtuvia siirtymiä. Ruokatuotteet ovat yleensä kimmoisia ja kestävät jonkin verran iskuja, ellei pakkaus itsessään ole jäykästä materiaalista. Tärähdyksiä aiheuttavat myös inhimilliset syyt, kuten kuljettajan ajotapa tai ajoneuvon huonot lastauskäytännöt. [26]

Kaikki pakkaukset joutuvat kestäämään tärinää kuljetusketjun aikana. Maantiekuljetuksissa tärinän taajuus on tyypillisesti 30 Hz. Pakkausten kokemaa tärinää on selvittänyt esimerkiksi Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA. [27] Kuljetuksen aikaiseen tärinään vaikuttaa moni tekijä, kuten tien epätasaisuus, matkustusnopeus, akseleiden määrä ja akselimassa ja jousitus. [25]

Ongelmia tärinästä aiheutuu erityisesti, jos pakkaus resonoi tärinän taajuuden kanssa. Joskus myös pinossa olevat pakkaukset päätyvät resonoimaan toistensa kanssa niin, että lopulta koko pino pomppii. Tällöin erityisesti pinon alimpaan pakkaukseen kohdistuu voimia, jotka ovat monta kertaluokkaa suurempia suhteessa sen päälle asetettujen pakkausten painoon. [10] Parhaiten tärinästä aiheutuvia vahinkoja estetään pakkaussuunnittelulla ja estämällä tai vähentämällä tuotteen mahdollisuutta liikkua kuljetuksen aikana sekä varovaisella käsittelyllä. [25]

Myös puristusvoimille altistuvat kaikki pakkaukset. Pakkaukseen kohdistuvat puristusvoimat voidaan jakaa dynaamisiin ja staattisiin. Staattiset puristusvoimat ovat merkityksellisempiä ja niitä esiintyy erityisesti varastoinnin aikana. Materiaalin kyvyssä kestää dynaamisia ja staattisia voimia on yhteys. Staattisen puristusvoiman kestävyyttä mitataan laboratorio-oloissa usein dynaamisen voiman testeillä. Erityisesti aaltopahvin osalta puristusvoiman kestoon vaikuttaa myös ilmankosteus ja lämpötila. Tyypillisesti kantavaa pakkauksen osaa valittaessa, sen mitatun kantokyvyn tulisi olla kolmesta seitsemään kertaa suurempi kuin kuorma, jolle sen odotetaan säilytyksen aikana altistuvan. [10] Myös puristusvoimien osalta asianmukaiset työkäytännöt ovat tärkeä vahinkojen ehkäisyn kannalta. Vahinkoja lisää erityisesti pakkausten ylitäyttö. [26]

Dynaamisia puristusvoimia pakkaus kohtaa tyypillisesti, esimerkiksi matalataajuisen värinän muodossa sekä siirrettäessä sitä erilaisilla välineillä. [25] Kun tavaroita kuljetetaan lavoilla, lavan rakennustapa vaikuttaa paljon siihen, miten suuria kuormia se kestää. Jäykän primääripakkausten kantokyky voi vaikuttaa paljonkin sekundaaripakkauksen kantokykyyn, jos pakkaussuunnittelussa on otettu huomioon, millaiselle alalle voimat kohdistuvat ja millaisille rakenteille ne jakaantuvat.

Lävistäviä voimia pakkaus ei kohtaa kuin vahinkotilanteissa ja niitä vastaan pakkaussuunnittelulla ei voida kustannustehokkaasti suojautua. Lävistävä voima voi kohdistua esimerkiksi trukin haarukan tai pakkauslavasta irronneen särön osuessa pakkaukseen. Ensimmäistä kohtaan tehokkainta suojautumista on kouluttaa varasto- ja kuljetushenkilökuntaa.

Logistiikkaan liittyvien pakkausten ympäristövaikutusten osalta voi sanoa melko vähän yleispäteviä lainalaisuuksia. Jos mahdollista, kannattaa kuitenkin:

- minimoida tuotteen kosteussisältö, koska sillä on iso vaikutus liikuteltavaan massa.
- suunnitella pakkaukset mahdollisimman hyvin pakkautuviksi (suorakulmaisiksi) ja tilavuudeltaan pieniksi. Standardinmukaiset pakkaukset lisäävät logistiikan tehokkuutta.
- pakata bulkkituote primääripakkauksiin lähellä kuluttajaa ja vähittäiskauppaa. Tästä on ollut etua esimerkiksi alemman hintaluokan viineissä, jotka eivät vaadi ikääntymistä pulloissa. [15]

3.1.5 Pakkausprosessi

Tuote on lähtökohta myös pakkausprosessille ja niille vaatimuksille, miten pakkausmateriaalin pitää toimia. Ruoka voi olla joko nestettä tai kiinteää. Nesteiden viskositeetti, homogeenisuus ja pintajännitys vaihtelevat. Pintajännitys vaikuttaa nesteen vaahtoutuvuuteen pakatessa. Samoin kiinteiden aineiden tiheys, raekoko ja muoto,

homogeenisuus, hauraus, paakkuuntuvuus ja kosteuspitoisuus vaikuttavat niiden liikuteltavuuteen ja samalla pakkausprosessiin. Myös tarvittu mittaustarkkuus pakkauskoossa tuottaa rajoitteita prosessille. Mittaustarkkuuteen vaikuttaa taas esimerkiksi tuotteen arvo. [28]

Pakkausmenetelmät vaihtelevat ja esimerkiksi pakkauksen jäykkyys vaikuttaa sen soveltuvuuteen tietyille pakkausmenetelmille. Jos pakkausprosessissa luodaan pakkaukseen tyhjiö tai alipaine, jäykät materiaalit pitävät muotonsa ja soveltuvat näihin menetelmiin. Jotkut tahnat taas täytetään tuubeihin pohjasta lähtien ja materiaalin tulee kestää tämä eikä niihin saa jäädä ilmataskuja. Osa tuotteista, kuten hillot, pakataan kuumina ja tällöin materiaalin pitää kestää lämmönvaihtelu. Säilykkeet pakataan ilmatiiviisti ja kuumennetaan pakkauksissaan. Lämpöä käytetään usein myös sulkemaan ja muovaamaan pakkaukset.

Pakkausmateriaalien käsittelyyn pakkauslinjastolla vaikuttaa pakkauksen ja linjaston välinen kitka. Toisaalta linjastoilla käytetään erilaisia sensoreita pakatun tuotteen tarkistamiseen. Tuotteesta riippuu, millainen sensori valitaan. Tyypillisesti sensorit perustuva jonkin sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden tai ultraäänen käyttäytymiseen läpäistessään pakkauksen.

3.2 Muutokset yhteiskunnassa

3.2.1 Yleistä

Tällä hetkellä voidaan tunnistaa monia globaaleja megatrendejä, jotka vaikuttavat ruuan tuotantoon, kulutukseen ja vähittäismyyntiin. Nämä lopulta ohjaavat myös ruokapakkausten tulevaisuutta. Suuria globaaleja yhteiskunnallisia muutoksia ovat esimerkiksi:

1. Ilmastonmuutos
2. Väestönkasvu
3. Kaupungistuminen ja pienet taloudet

4. Lisääntyvät tulot ja taloudellisen eriarvoisuuden kasvu

5. Teknologinen kehitys

Seuraavassa käydään läpi näitä trendejä tarkemmin ja mitä ne voivat tarkoittaa tulevaisuuden ruokapakkauksiin kohdistuvien vaatimusten näkökulmasta.

3.2.2 Ilmastonmuutos, väestönkasvu ja taloudellinen epätasa-arvo

Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan ruuantuotantoon merkittävästi. Ilmastonmuutoksen keskeisiä vaikutuksia ovat:

- keskilämpötilojen nousu
- sadanta-alueiden ja sademäärien muutokset
- sään ääri-ilmiöt
- merenpinnan nousu
- vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen ja pölyttävien hyönteisten määrään

On arvioitu, että ilmastonmuutoksen vaikutukset vaihtelevat paljon eri paikkojen ja ajankohtien välillä, mutta kokonaisvaikutus ruuantuotantoon on negatiivinen ja ruuan hinta nousee joko tasaisesti tai nopeasti heilahdellen vuosisadan puoleenväliin mennessä. [29, 30] Ilmastonmuutokseen voidaan sopeutua kestävämmillä, mutta vähemmän tuottoisilla lajikkeilla. Ruokapakkausten näkökulmasta tällä on merkitystä, jos ruokahävikin vähentäminen tulee myös taloudellisesti tärkeämmäksi.

Globaalisti ruoan tuotantoketjuihin liittyvä teollisuus on merkittävä työllistäjä ja erityisesti kaupunkiin muuttaneiden naisten elinkeino. Toisaalta ruoan jakeluketjuissa tapahtuu merkittävää ruokahävikkiä erityisesti globaalissa etelässä. [31]

Ruuantuotannon ilmastonmuutokseen ja kaupungistumiseen sopeutumisen keinona on puhuttu myös kaupunkiviljelystä. Tämä lyhentää kuljetusketjuja ja parantaa kaupunkien ruokaturvaa. Jo nykyisellään kaupungeissa tuotettu ruoka ruokkii Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO:n mukaan 800 miljoonaa ihmistä. [32] Vuonna 2013 Yhdysvaltain maatalousministeriön mukaan noin 15 % maailman ruuasta kasvatettiin kaupunkialueilla. [33]

Pölyttävien hyönteisten määrässä on tapahtunut suurta laskua. Tällä on vaikutuksia sekä satojen määrään että laatuun. Joillekin viljelykasveille hyönteispölytys on välttämätön ja enemmistölle viljelykasveista hyönteispölytyksestä on merkittävää hyötyä. [34]

Maankäytön vaikutukset ilmastonmuutokseen ovat merkittäviä ja moniulotteisia. Tämä on tärkeää myös nanoselluloosan raaka-aineiden osalta. Raaka-ainetuotannossa tärkeää ovat myös välilliset maankäyttövaikutukset. Jos raivataan uutta viljelypinta-alaa, voivat hiilinielut muuttua hiilen lähteiksi. Toisaalta maaperä on merkittävä hiilinielu ja maaperän hiilinieluissa on suuri potentiaali ilmastonmuutoksen hillintään. [35]

Suomessa tällä on merkitystä esimerkiksi suopeltojen osalta. Ennallistamalla ojitettuja turvemaita hiilinielua olisi mahdollisuus kasvattaa. Toisaalta jo suopeltojen metsittäminen kääntää ilmastovaikutuksen kasvihuonekaasuja sitovaksi nieluksi. [36]

IPCC:n mukaan sään ääri-ilmiöiden esiintyminen lisääntyy ja tällä on merkittävä vaikutus ruokaturvaan. [30] Sademäärät ja lämpötilat vaihtelevat enemmän, joka johtaa kuivien kausien yleistymiseen. Tällä on erityisen suuri vaikutus sadevesistä riippuvaisiin pientiloihin ylängöillä ja tropiikissa, joiden osuus on noin 80 % maailman viljelypinta-alasta ja tuottavat noin 60 % maailman maataloustuotannosta. [31]

Ilmastonmuutoksen ja väestönkasvun vaikutukset ruoan tuotantoketjuihin ovat yhtenevät. Väestönkasvu lisää ruuan globaalia kysyntää. FAO:n mukaan vuosisadan puoleen väliin mennessä ruuan kysyntä nousee 60 %, jos ruokahävikin määrässä ei tapahdu suuria muutoksia. [37] IPCC on päätenyt samanlaisiin lukuihin ja esittää, että ruuan tuotannon kasvun tulisi olla 14 % vuosikymmenessä, jos maailman väkiluku nousee yhdeksään miljardiin vuoteen 2050 mennessä. [30]

Ruuan kysynnän kasvu ja hinnan nousu tarkoittaa suurempia maataloustuotannon tuloja joissain osissa maailmaa, joissa ilmastonmuutoksen vaikutus tuotantoon jää vähäiseksi. Suurimmassa osassa maailmaa tuottavuuden heikkeneminen ja sopeutumiseen kuluvat investoinnit ovat suurempia kuin kertyvät lisätulot. Ruuan hinnan nousu tulee arvioiden mukaan lisäämään aliravitsemusta köyhimmissä väestönosissa. [30]

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneeli IPCC:n viidennen arviointiraportin mukaan ruokajärjestelmien sopeutumista ilmastonmuutokseen ei ole tutkittu tarpeeksi alkutuotannon ulkopuolella. Sopeutumismahdollisuuksia ja potentiaalisia innovaatioita tulisi tutkia erityisesti ruuan prosessoinnin, pakkaamisen, kuljetuksen, saavutettavuuden, säilytyksen ja kaupan osalta. [30]

3.2.3 Kaupungistuminen

Kaupungistumisen megatrendi voi vaikuttaa pakkauksiin esimerkiksi sitä kautta, että asumisen neliöhinnat karsivat ruokaan liittyvien toimintojen liittämistä kodin yhteyteen. Tällaista kehitystä on havaittu esimerkiksi Hong Kongissa. [38] Kehitys on kuitenkin vahvasti kulttuurisidonnaista. Kylmäsäilytyksen tilat voivat olla vähäiset tai ruuanvalmistuksessa suositaan puolivalmisteita. Vuosien 1960 ja 2015 välillä ruoan jakeluketjut ovat pidentyneet huomattavasti. Maatalous ja ruokaketjut ovat muuttuneet teollistuneiksi ja globaaleiksi. Ruuan matka alkutuotannosta lautaselle on pidentynyt. Prosessoitujen ja pakattujen ruokien kulutus on maailmanlaajuisesti lisääntynyt kaikissa muissa paitsi eristyneimmissä maaseutuyhteisöissä. [31]

Ruuan kulutus voi siirtyä kodin ulkopuolelle. Kodin ulkopuolella nautittavat välipalat ja ateriat yleistyvät. [39, 40] Ruokapakkauksen tulee tukea tätä. Mahdollisesti tämä johtaa pakkausmateriaalien kysynnän kasvuun, joka lisää ympäristövaikutusten merkitystä. Ruokaan ja erityisesti valmisruokiin liittyy paljon arvoasetelmia, joiden vaikutukset ihmisten ruokavalintoihin ja kulutukseen ovat monimutkaisia ja usein myös sisäisesti ristiriitaisia [41]. Ei ole mitenkään helposti tulkittavissa, mihin suuntaan kulutustottumukset ovat matkalla ja voi olla, että kuluttajaryhmien välille muodostuu myös isoja eroja.

Suomessa yksineläjien määrä kasvaa [42]. Samanlaisia trendejä on nähtävissä myös muualla kaupungistuneilla alueilla. Tämä liittyy ruokapakkausten kokoon ja lisää myös pakkausmateriaalien kysyntää, jos pakkauskoot pienenevät ja tuoretuotteiden käyttö jatkaa kasvuaan. Toisaalta monessa kodissa on kaksi työssäkäyvää aikuista, kun ydinperheestä ja naisten työssäkäynnistä on tullut uusi normi. Naisten työssäkäynnissä on kuitenkin isoja eroja Euroopan maidenkin välillä.

Jo nyt on nähtävissä suurta jakautumista erilaisten kuluttajaryhmien välillä. Terveys, ylipaino ja esimerkiksi kasvien kulutus ovat eriytyneet ryhmien välillä [43-45]. Jos tulo- ja varallisuuserot jatkavat kasvuaan, voivat kulutustottumusten erot kasvaa lisää.

3.2.4 Teknologiset muutokset

Kauppa ottaa Suomessa ensiaskeleitaan ruuan nettikauppaan [46]. Malleissa on useita haasteita kannattavuuden suhteen. Erityisesti kuljetuksen hinta ja nopeus ovat kynnyskysymyksiä ruuan verkkokaupan yleistymisessä. Toisaalta esimerkiksi tuoretuotteissa on vaikea nähdä, että kuluttajat luopuisivat täysin mahdollisuudesta tarkastella tuotetta ennen ostopäätöstä.

Robotisaation odotetaan olevan iso yhteiskunnallinen muutos. Automaatio tulee useille alueille. Kaupan alalla erityisesti varastonhallinta automatisoituu entisestään ja ehkä myös hyllytys. Tällä hetkellä kuljetuspalveluissa on käytössä sekä paketin muotoon että painoon perustuva hinnoittelu. Nämä voidaan määrittää entistä tarkemmin ja helpommin myös varastoissa ja varastojen automaatiolla voidaan optimoida tuotteiden säilytystä, poimintaa ja myös sekundaarista pakkaamista, joissa useita tuotteita pakataan yhteen pakkaukseen. Sekundaarinen pakkaus voidaan tuottaa myös on-demand -periaatteella, jossa jokainen pakkaus tuotetaan tarpeen mukaan. Samalla voidaan suorittaa laaduntarkistus.

Toisaalta automaatio leviää myös globaalin pohjoisen kotitalouksiin. Lähitulevaisuudessa kotiautomaatio saattaa esimerkiksi tilata tuotteen verkkokaupasta, kun havaitsee sen olevan vähissä. Ei ole selvää, millä teknologialla tällaiset skenaariot toteutetaan ja onko pakkausteknologioilla niissä rooli. Älypakkaukset olivat pinnalla joitakin vuosia sitten. Vaikka teknologiat kehittyvät huimalla nopeudella ja hintatasot laskevat, voi olla, että

pakkauksiin integroitavat sensorit eivät lyö itseään läpi lainkaan, koska on tehokkaampaa ratkaista kotien ja vähittäiskaupan automaation kysymyksiä keskitetympin. Useimmat sensorit ovat kertakäyttöisiä ja vaikeuttavat pakkausten kierrätystä ja uusiokäyttöä. IoT (*Internet of Things*) on perustunut pilvipalvelupohjaisiin ratkaisuihin ja näin voi odottaa käyvän ruokapakkauksiin liittyvän älyteknologiankin kohdalla. Keskeinen kysymys on tietoturva.

Sekä kuluttajilla että vähittäiskaupalla on Euroopassa toistaiseksi melko negatiivinen asenne ruuan älypakkauksiin. Vähittäiskauppa ei innostu sovelluksista, jotka lisäävät ruokahävikkiä, jos pakkaustekniikka osoittaa tuotteen olevan vähemmän kuin täydellinen. Toisaalta hävikkiä voidaan vähentää pidentämällä ”parasta ennen”-päivämäärää, jos voidaan osoittaa täydellisen kylmäketjun toteutuneen kuljetuksessa ja mahdollisia päivämääriin sisällytettyjä varoaikoja voidaan lyhentää.

Riippuen tekniikasta, jakeluketjun toimijoiden vastuu häiriöistä ei välttämättä kulje indikaattoritiedon mukana. Voi esimerkiksi olla vaikea osoittaa katkenneen kylmäketjun aiheuttaja. Tähän pystytään esimerkiksi RFID-siruihin liitetyillä sensoreilla, mutta toisaalta vastassa voi olla kuluttajan tietosuoja. Myös yrityksen logistiikan seuranta voidaan sekoittaa, jos tietoturvasta ei ole huolehdittu. [47] Toisaalta esimerkiksi tietyn bakteerin esiintymistä mittaavat sensorit antaisivat väärän viestin tuotteen turvallisuudesta, jos sensorit eivät mittaa tarpeeksi laajaa kirjoa. Myös EU-lainsäädäntö on hidastanut älypakkausten yleistymistä. [48]

Kuluttajilla on älypakkauksia kohtaan kaksi keskeistä negatiivisten asenteiden lähdettä. Ensimmäinen on hinta. Aktiivisen materiaalin tai sensorin hinta on edelleen korkea, jopa 50 - 100 % koko pakkauksen hinnasta [48]. Pakkausmateriaalien hinnan merkitys on kuitenkin suhteessa ruuan hintaan ja ruokahävikkiä vähentävien teknologioiden käytöstä tulee taloudellisesti kannattavampaa, jos ruuan hinta nousee. Toisaalta samanlaista kysynnän ja hinnan nousua voi tapahtua pakkausmateriaaleissa. Toinen kuluttajille tekijä on turvallisuus. Erityisesti pakkausten sisälle lisättävät erillisten sensorien pelätään tulevan niellyiksi tai vuotavan ruuan joukkoon [48].

Lisätyn todellisuuden sovellukset tulevat todennäköisesti mukaan vähittäiskauppaankin lähivuosina. Tämä voi vaikuttaa paljonkin pakkausten ulkonäköön tai toiminnallisuuksiin. Käytännössä kuluttajat odottavat löytävänsä entistä paremmin ja tarkempaa tietoa tuotteista ja niiden saatavuudesta tietoverkkojen välityksellä.

3.2.5 Yhteiskunnalliset kuluttajat

Muutokset ihmisten elintavoissa ja ruuankulutuksessa muuttavat myös pakkauksiin kohdistuvia odotuksia ja vaatimuksia. Keskeisiä nähtävissä olevia muutoksia ovat:

1. Talouksien pieneneminen ja ikääntyminen
2. Ruuan kulutus kodin ulkopuolella
3. Kiinnostus ruuan ja pakkausten ympäristövaikutuksiin
4. Kiinnostus ruuan ravitsevuuteen, turvallisuuteen ja luonnollisuuteen [49].

Näillä kaikilla on vaikutuksensa elintarvikepakkauksiin kohdistuville odotuksille ja vaatimuksille. Ilmastonmuutos ajaa yhteiskuntia etsimään vähän energiaa kuluttavia ratkaisuja tuotteiden koko elinkaaren ajalta. Raaka-aineiden tuotanto, jalostus, energiantuotanto ja kuljetus vaativat kaikki vähähiilisiä ratkaisuja.

Tutkimuksissa on todettu, että kuluttajilla on erityisen suuri kiinnostus pakkausten ympäristövaikutuksiin. Kuluttajat kokevat ylipakkaamisen ympäristöuhaksi ja paljon on myös puhuttu muovin ympäristövaikutuksista. Viime aikoina mediassa on erityisesti nostettu esiin muovijätteen ja erityisesti pienten muovihiukkasten kerääntyminen vesistöihin. Mikromuoveihin on myös todettu rikastuvan ympäristöön nähden tuhatkertaisia pitoisuuksia myrkyllisiä yhdisteitä suhteessa muun elinympäristön pitoisuuksiin [50, 51]. Kuitenkin suurin osa mikromuovista ei tule pakkausjätteestä, vaan esimerkiksi liikenteestä.

Kaikkiaan 8,3 miljardia tonnia muovia on tuotettu vuoteen 2017 mennessä, josta 9 % on kierrätetty, 12 % poltettu jätteenpoltossa ja 79 % on päätynyt kaatopaikoille tai luontoon.

Voidaan ennustaa, että 12 miljardia tonnia muovia lisää päätyy kaatopaikoille ja luontoon vuoteen 2050 mennessä, jos jätteenkäsittelyssä ei tapahdu isoja uudistuksia. [52] Vuosien 2004 ja 2014 välillä muovintuotanto kasvoi 34 %. Muovin tuotannossa kierrätysmateriaalien osuus on kasvussa, mutta suurin osa muovista tehdään raakaöljystä. Vaikka raakaöljyä käytetään muoviin vain vähän, suurimman osan kulutuksesta suuntautuessa liikennepolttoaineisiin, öljy on myös kansainvälisen politiikan väline.

Suomessa ja Euroopassa halutaan vähentää riippuvuutta epävakasta tai toimissaan kansainvälisiä sopimuksia loukkaavista valtioista. Suomessa yli 80 % raakaöljystä tuli Venäjältä vuonna 2015 [53]. Venäjä on kuitenkin EU neuvoston päätösten nojalla, Ukrainan suvereniteettia loukkaavien toimien johdosta, ollut erilaisten vienti- ja tuontipakotteiden alainen vuodesta 2014 ja EU komissio jatkoi pakotteiden toimeenpanoa vuonna 2017 [54]. Suomi EU:n jäsenvaltiona on osallinen pakotteista.

Vaikka kuluttajat ovat kiinnostuneita erityisesti pakkaamisen ympäristövaikutuksista, usein on kyse mielikuvista. Esimerkiksi ruuan ympäristövaikutukset painottuvat selkeästi alkutuotantoon ja jos paremmalla pakkaamisella onnistutaan vähentämään kuljetuksessa, vähittäiskaupassa ja kotitalouksissa pilalle mennyttä ruokaa, voi lisäpakkaamisen ympäristövaikutus kääntyä positiiviseksi.

Vaikka kuluttajilla on kiinnostus ympäristöystävällisiin ratkaisuihin, kuluttajien tiedot eivät välttämättä ole riittäviä, jotta he pystyisivät arvioimaan pakkausten elinkaarivaikutuksia. Näin ollen myös pakkausteollisuudelle ja brändeille voi syntyä kannustimia viherpesuun ja näennäisratkaisuihin. Tarvitaankin tutkittua tietoa päätösten tueksi.

3.3 Pakkaamisen ympäristövaikutukset

3.3.1 Kestävä kehitys

Usein vastuullisuudessa nojataan Brundtlandin alkuperäiseen ajatukseen kestävästä kehityksestä. [55] Yhdistyneiden kansakuntien Ympäristön ja kehityksen maailmankomissio, jota Brundtland johti vuonna 1987 määritteli kestävä kehitys: ”Kestävä kehitys on kehitystä, joka tyydyttää nykyhetken tarpeet viemättä tulevilta

sukupolvilta mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa.” [55] Brundtlandin kestävän kehityksen mallissa sekä ympäristön kestävyys, sosiaalinen kestävyys että taloudellinen kestävyys leikkaavat ja leikkauksesta löytyy kestävä kehitys.

Toinen kestävän kehityksen määritelmä on World Business Councilin: “Meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. Eli kestävä kehitys on vastata tämän päivän tarpeisiin asettamatta vaaraan tulevien sukupolvien kykyä vastata omiin tarpeisiinsa.

Koko kestävän kehityksen konseptia on kritisoitu ja se onkin vahvasti toisen maailmansodan jälkeisen jälleenrakennuksen aikana syntynyt ajatus. Tästä kestävän kehityksen mallista on kuitenkin liikuttu jo eteenpäin ja ympäristön kantokyvyn nähdään olevan kaiken taloudellisen toiminnan reunaehtoina ja rajoina. Muutostahti maailmassa on kuitenkin nopea. Talouden kasvu, resurssien rajallisuus sekä tuotannon ulkoisvaikutukset ovat vieneet maapallon kantokyvyn lähelle useita rajoja.

3.4 Nanoselluloosa pakkauksissa

Pakkaamisessa nanoselluloosalla voi olla monia rooleja. Se voi korvata muovikalvoja, muovimateriaaleja tai kartonkien muovipäällysteitä. Se voi toimia lisäaineena paperin ja kartongintuotannossa.

Nanoselluloosan positiivisia avainominaisuuksia pakkausteknologian kannalta ovat:

- lujuusominaisuudet, erityisesti korkea vetolujuus
- kyky muodostaa kalvoja
- läpinäkyvyys
- barrier-ominaisuudet eli vähäinen kaasujen läpäisevyys
- biohajoavuus ja toisaalta myös uusiutuvat raaka-aineet

- turvallisuus elintarvikekäytössä
- kemiallinen muokattavuus

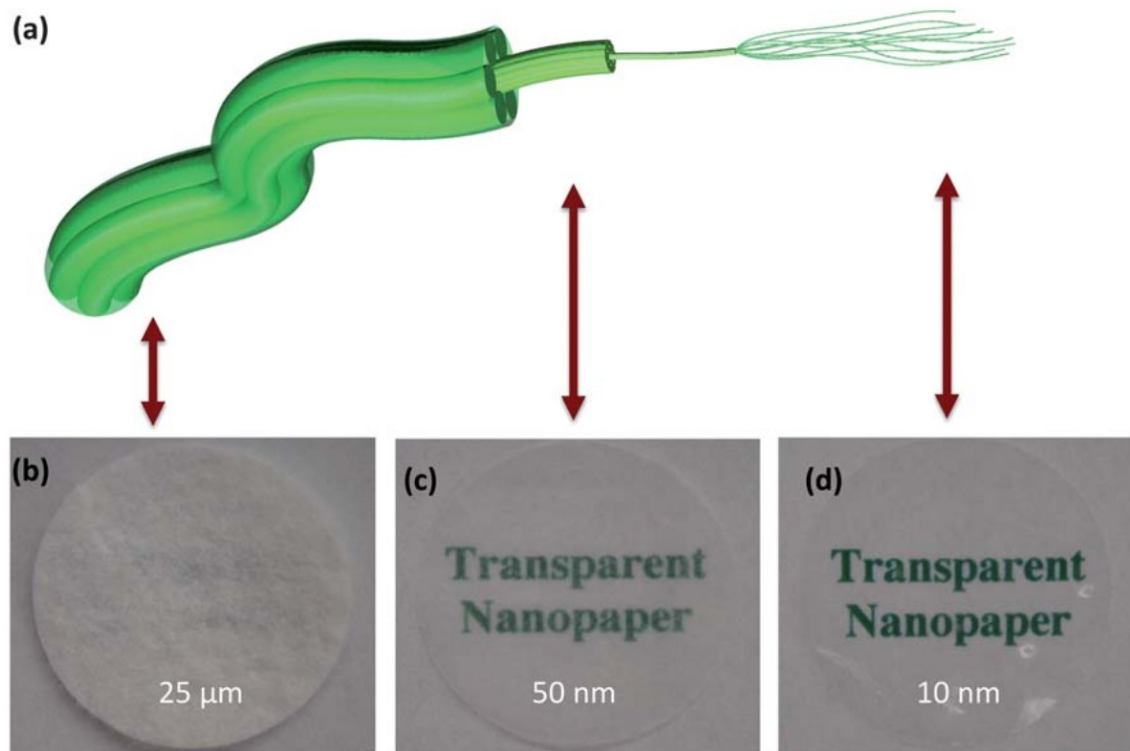
Negatiivisia ominaisuuksia pakkausteknologian kannalta ovat:

- hydrofiilisyyys
- tuotannon suuri energiankulutus

Lisäaineena nanoselluloosa lisää sidoksia selluloosakuitujen välillä, jolloin materiaali saavuttaa samat lujuusominaisuudet, vaikka sen paksuus ja neliömassa pienenevät. Tästä voi seurata säästöjä kuljetuskustannuksissa, polttoaineen kulutuksessa ja kuljetuksen päästöissä. Nanoselluloosan osuus materiaaleissa on kuitenkin lisäaineena pieni. Nanoselluloosa lisää myös komposiittien lujuutta.

Jos halutaan valmistaa läpinäkyvä kalvo, nanoselluloosakuitujen pitää olla riittävän ohuita. Tällöin näkyvän valon vuorovaikutus kuidun kanssa jää vähäiseksi. Myös kalvojen pakkautumistiheys ja täten ilmaan syntyvät rajapinnat vaikuttavat optisiin ominaisuuksiin. [56, 57] Kuva 8 esittää esimerkin kuitujen paksuuden vaikutuksesta kalvojen läpinäkyvyyteen, kun näytteiden paksuus on sama.

Nanoselluloosakalvot ovat hydrofiilisiä. Tämä voi olla ongelma ruokapakkaussovelluksissa, koska ruuassa on usein vettä tai kosteutta. Nanoselluloosakalvo voidaan saada hydrofobiseksi päällystämällä [58], lisäaineilla tai kemiallisilla muokkauksilla. Päällysteiden soveltuvuutta elintarvikepakkausten materiaaliksi ei käsitellä tässä tutkimuksessa.



Kuva 8 Kuitujen paksuudella on vaikutusta paperin tai kalvon optisiin ominaisuuksiin. (a) hahmottelee selluloosakuidun rakenteen hierarkiaa. Kuvassa (b) on 25 μm paksusta selluloosakuidusta valmistettua paperia (c) kuidun paksuus on 50 nm ja kuvassa (d) kuidun paksuus on 10 nm. Kaikkien näytteiden paksuus on sama 40 μm . Kuvan esimerkissä näytteiden läpinäkyvyys lisääntyy, kun kuitujen paksuus pienenee. [56]

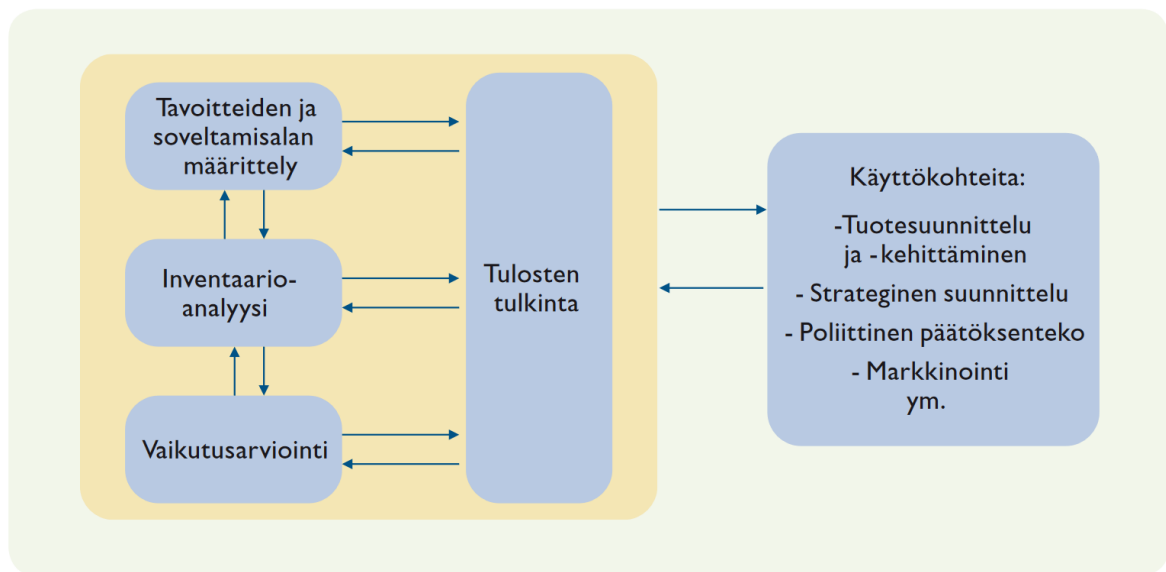
Nanoselluloosalla voidaan vähentää polystyreenin eli vaahtomuovin käyttöä. Tärkkelyksen ja selluloosan seos on uusiutuvista raaka-aineista tuotettu ja biohajoavaa. Polystyreeniä käytetään pakkauksissa esimerkiksi muotoiltuina tukina ja erilaisina säilytyskoteloina.

4 ELINKAARIARVIOINTI

4.1 Yleistä

Elinkaariajattelun ytimessä on pyrkimys havaita ja estää haitallisten ympäristövaikutusten siirtyminen käytön ja valmistuksen vaiheesta toiseen, vaikutusluokkien välillä tai ajallisesti. Tyypillisesti yrityksissä elinkaariajattelua käytetään tuotteiden tai prosessien suunnittelun tukena tai ympäristöviestinnässä. Elinkaarianalyysit tuottavat tietoa myös lainsäädännön pohjaksi. Elinkaarianalyysi on tarkasti määritelty ja standardoitu. Sitä pidetäänkin yleisesti ympäristövaikutuksia arvioivista menetelmistä tieteellisimpänä. Samalla standardinmukainen elinkaariarviointi on melko raskas työkalu. Myös elinkaariarvioinnin lähtökohdilla ja rajauksilla on paljon vaikutusta sillä saatavan tiedon sovellettavuuteen.

Muita elinkaariajattelua hyödyntäviä ympäristövaikutusten arviointityökaluja ovat esimerkiksi vesi-, hiili- ja ekologinen jalanjälki, materiaalivirta-analyysit ja termodynaamiset menetelmät.



Kuva 9 Elinkaariarvioinnin vaiheet ISO 14040:2006 mukaan. [59]

4.1.1 Elinkaariarvioinnin historia

Elinkaariajattelua alettiin käyttää ensin taloudellisten vaikutusten määrittämisessä kustannus-hyöty-analyysin myötä. Edelleen kustannus-hyötyanalyysi on elinkaariarvioinnin kilpailija ja vaihtoehto, jota käytetään erityisesti Yhdysvalloissa, mutta myös EU:n alueella. [60] Ensimmäinen ympäristövaikutusten elinkaariarviointi toteutettiin Coca-Cola Companyn toimeksiannosta vuonna 1969. Harry E. Teasley Jr. vastasi Coca-Colan pakkauksista ja kehitti ajatuksen määrittää pakkauksen energia- ja materiaalivirrat sekä ympäristövaikutukset juomapakkauksen elinkaaren kaikista vaiheista materiaalityönnästä pakkauksen loppusijoitukseen asti. [61]

Tämä oli täysin uusi tarkastelukulma pakkaukseen. Ympäristövaikutusten kokonaisvaltainen tarkastelu oli vasta tällä vuosikymmenellä tullut osaksi tiedeyhteisön näkökulmaa. Energiavirtojen laskeminen osaksi elinkaaritarkastelua oli myös täysin uutta maassa, jonka energiapolitiikka oli menneellä vuosikymmenellä tähdännyt lähinnä energiankäytön lisäämiseen kotimaisen kysynnän vahvistamiseksi. Vuoden 1973 OPEC-maiden arabijäsenten tuottama öljykriisi tapahtui vasta myöhemmin ja toi energiankulutuksen keskeiseksi osaksi ympäristötarkastelua.

Ensimmäiset elinkaariarvioinnit olivat yksityisten yritysten tilaamia ja niissä tarkasteltiin usein pakkausmateriaaleja. Muovit olivat valtaamassa markkinoita ja elinkaariarvioinneista haettiin tukea pakkausratkaisuille ja niitä ohjaavalle politiikalle. Erityisesti oltiin kiinnostuneita jätteen määrästä, joka oli lähtenyt kasvuun.

4.2 Määrittelyvaihe

Määrittelyvaiheessa muotoillaan ne kysymykset, joihin elinkaariarviointi pyrkii vastaamaan. Määrittelyvaiheessa todetaan myös mille yleisölle arviointi julkistetaan ja mihin käyttöön se suunnataan. Tyypillisesti yleisö määrittelee paljon arvioinnin aikana tehtäviä valintoja ja rajoituksia. Jos halutaan osoittaa todeksi ympäristöväite yrityksen ulkoiseen viestintään, täytyy arviointiin käyttää ulkopuolisia asiantuntijoita ja väitteiden tueksi hankitun tiedon laatuun tulee kiinnittää erityistä huomiota. Jos elinkaariarviointi tehdään tuotekehityksen tueksi, voidaan tutkimuksessa käyttää paljon enemmän yksinkertaistuksia ja rajoituksia. [62]

Elinkaariarvioinnin keskeisiä käsitteitä on toiminnallinen yksikkö (functional unit). Koska ei ole järkevää verrata esimerkiksi käsipyyhepaperia ja -rullajärjestelmää toisiinsa esineinä, kiinnitetään yleensä huomio siihen millaisen palvelun tuote tuottaa. Näin ollen voidaan verrata sitä, mitä kummaltakin tuotejärjestelmältä vaaditaan, jotta saadaan yksi käsipari kuivattua. Jos tuote ei on pitkäikäinen, voidaan jakaa sen tuottamiseen tarvittavat resurssit määriteltujen käyttökertojen kesken. Samoin voidaan tehdä syntyvälle jätteelle ja päästöille, jolloin eri tuotejärjestelmistä tulee vertailukelpoisia.

Elinkaariarviointien malleissa lähes aina tuotesysteemit mallinnetaan käyttäytymään lineaarisesti. Eli jos tuotetaan kilogramman sijaan kolme kilogrammaa, kaikki päästöt lisääntyvät samassa suhteessa. Tämä oletus on elinkaariarvioinnin ytimessä. [60] Se voi kuitenkin joskus rajoittaa elinkaariarvioinnin soveltuvuutta. Myös muunlaiset mallit ovat mahdollisia, mutta niiden käyttäminen tekee arvioinnista monimutkaisen ja vaikeamman toteuttaa. [62]

Määrittelyvaiheessa voidaan pyrkiä ottamaan kantaa myös tuotejärjestelmän rajaukseen, vaikutuskategorioihin ja tarvittavaan inventaariotietoon, mutta on hyvin todennäköistä, että näihin joudutaan palaamaan vielä arvioinnin myöhemmissä vaiheissa. Elinkaariarviointi on iteratiivinen prosessi, jossa myöhemmissä vaiheissa saatu tieto voi muuttaa alun perin tehtyjä rajoituksia. [59, 60, 62]

Tuotesysteemin rajausta ei ole koskaan täysin yksiselitteistä. Periaatteessa mikä tahansa tuotesysteemi voidaan käsittää äärettömän laajaksi, jos jokaisen toimintaan käytettävät koneet ja laitteet, niihin tarvittavat resurssit käydään yksityiskohtaisesti läpi. Ketjua voi jatkaa loputtomiin, mutta se ei tietenkään intuitiivisesti ole tarkastelun kannalta mielekästä. Yleisenä sääntönä on usein katsottu, että jos jonkun järjestelmän osan massa tai rahallinen arvo jää alle yhden prosentin kokonaismassasta tai -arvosta, tämä voidaan jättää huomiotta. Tämä toki on kehäpäättelmä, koska tällöin pitäisi olla selvillä jo osan arvo ja kokonaisuuden arvo. Sääntö on kuitenkin yleisesti käytössä. [60, 62]

Toinen vaihtoehto on katsoa lähes samanlaisia tuotesysteemejä ja tehdä arvio niiden perusteella. Esimerkiksi jos elinkaariarviointi tehdään jääkaapille, voidaan tarkastella

pakastimista tehtyjä elinkaariarviointeja ja päättää niiden perusteella, mitä voidaan jättää laskennan ulkopuolelle. [60]

Rajauksen voi tehdä myös tutkimuksen tarkoituksen perusteella. Jos halutaan vertailla kahta eri televisiota, voidaan aivan hyvin jättää tarkastelun ulkopuolelle televisiolähetysten tuotanto. Lähetysten tuotantoprosessi on jokaiselle televisiolle täsmälleen sama, riippumatta laitteen ominaisuuksista ja laitteiden väliset erot tulevat esiin muissa elinkaaren vaiheissa. [60]

Samoin tyypillisesti kiinteä omaisuus lasketaan tuotesysteemien ulkopuolelle. Toinen vaihtoehto on jyvittää kaikille tuotteille osuus esimerkiksi tuotantolaitoksesta ja koneista.

Toisen järjestelmän rajaukseen liittyvän ongelman tuottavat prosessit, joissa tuotetaan yhtä aikaa monia eri tuotteita. Tyypillinen esimerkki on esimerkiksi öljynjalostus, jossa samasta raaka-aineesta erotellaan useita eri jakeita. Tällöin pitää määritellä, millä tavoin jaetaan öljyntuotannon muiden vaikutusten, kuten raakaöljyn poraamisen ympäristövaikutukset eri jakeille. Ongelmaan on esitetty erilaisia ratkaisuja. Yksi tapa on laajentaa tuotesysteemiä niin, että tarkastellaan yhdessä myös sivutuotteiden tuotantoa. Tämä on ISO-standardin suosittelu tapa. [59, 60]

Toinen tapa käsitellä tuotesysteemiä, joka tuottaa monia eri tuotteita on ajatella, että sivutuotteiden avulla vältetään päästöjä. Tällöin voidaan määritellä tyypillinen tapa tuottaa kyseinen sivutuote ja laskea tuotesysteemin hyväksi vältetyt päästöt. Esimerkiksi jos jäteliete mädätetään ja tuotettu metaani otetaan talteen, voidaan laskea, että on vältetty vastaava määrä maakaasun tuotantoa. [59, 60]

Toinen vaihtoehto jakaa ympäristövaikutukset eri tuotteille on niin sanottu allokonti. Allokoinnissa tarkastellaan sivutuotteiden osuutta kokonaisuudessa ja jaetaan ympäristövaikutukset esimerkiksi fysikaalisten ominaisuuksien kuten massan tai energiasisällön tai toissijaisesti taloudellisen merkityksen suhteen. [59, 60]

Allokointi tulee kyseeseen myös niin sanotussa open-loop kierrätyksessä. Jos kierrätysmateriaali ei muuta fysikaalisia ominaisuuksiaan kierrätysprosessissa, sen

laskeminen osaksi suljettua systeemiä ei aiheuta ongelmia, koska kierrätysmateriaalin voidaan laskea korvaavan raaka-ainetta sellaisenaan. Mutta jos kierrätysmateriaalin ominaisuudet muuttuvat ja siitä tehdään täysin uudenlaisia tuotteita, pitää löytää tapa jakaa ympäristövaikutukset tuotesysteemien välille. Usein katsotaan, että jätteenkäsittelyn vaikutukset tulee allokoida alkuperäiselle tuotteelle niin pitkälle kunnes materiaalin arvo muuttuu taas positiiviseksi. [59, 60]

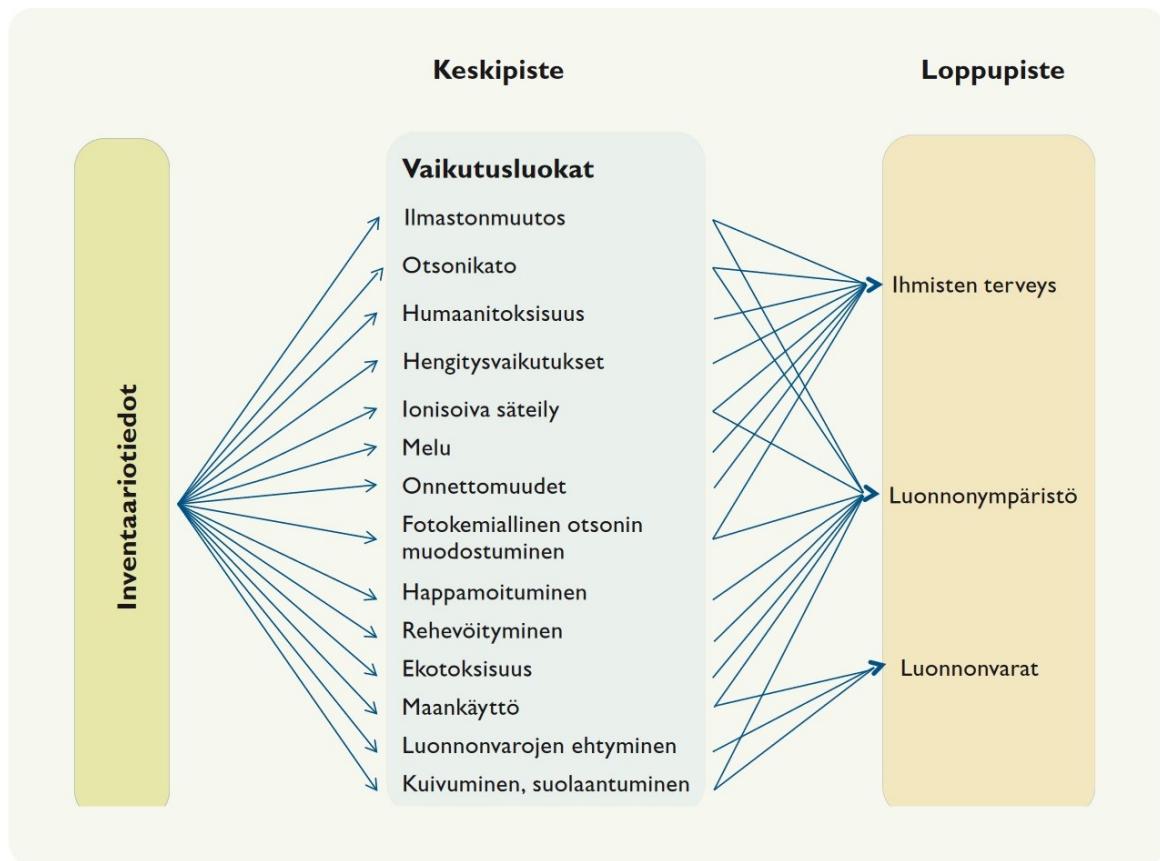
4.3 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysi on elinkaariarvioinnin työläin, mutta suoraviivaisin osa. Siinä koko tuotantoprosessi jaetaan yksittäisiksi suoritteiksi. Jokaiseen osaprosessiin määritellään siihen tulevat ja siitä lähtevät energia- ja ainevirrat.

Inventaarioanalyysissä pyritään käyttämään niin sanottua primääridataa aina kuin mahdollista. Primääridatalla tarkoittaa tarkastelun kohteena olevan tuotejärjestelmästä tai palvelusta suoraan mittaamalla hankittua tietoa. Usein primääridataa ei ole saatavilla tai se on vaikeasti hankittavissa. Tällöin voidaan käyttää tietokantoja, joihin on määritelty alueellisia ja tuotekohtaisia keskiarvoja. Tätä kutsutaan sekundaaridataksi.

4.4 Vaikutusarviointi

Inventaarioanalyysissä kerätty tieto voi käsittää esimerkiksi tuhat riviä erilaisia tulevia ja lähteviä energia- ja ainevirtoja toisin sanoen raaka-aineita ja päästöjä. Tällaisesta tiedosta on vaikea jäsentää, mikä on kunkin aineen vaikutus päästessään ympäristöön tai miten suuri vaikutus on suhteessa muihin päästöihin. Lisäksi tarvittaisiin suuri määrä erityisosaamista, jotta tällaisia päätelmiä voitaisiin tehdä. Siksi elinkaariarvioinneissa kaikki päästöt jaetaan vaikutusluokkiin. Samalla päästöllä voi olla useita eri vaikutusluokkia. Esimerkiksi freonit päästessään ilmakehään vaahtomuoveista aiheuttavat sekä yläilmakehän otsonikatoa että ovat merkittäviä kasvihuonekaasuja. Kuva 10 esittää ILCD:n (*International Reference Life Cycle Data System*) vaikutusluokkajakoa.



Kuva 10 ILCD:n vaikutusluokkajako sisältää useita keskipisteluokkia ja kolme loppupisteluokkaa. [63]

Otsonikato tai ilmastomuutos ovat elinkaaritarkasteluissa niin sanottuja keskipisteluokkia. Ne molemmat aiheuttavat menetettyjä terveitä elinvuosia ihmisille ja toisaalta köyhdyttävät luonnon monimuotoisuutta. Menetettyjä elinvuosia ja monimuotoisuuden köyhtymistä pidetään elinkaariarvioinneissa loppupisteiden luokkina. Loppupisteluokkia on yleisesti käytössä kolme tai joissain malleissa neljä. Ne ovat ihmisten terveys tai terveydellä painotettu elinikä, luonnonvarojen kulutus, luonnonympäristön köyhtyminen ja joissain tapauksissa elämää ylläpitävät prosessit. Elämää ylläpitävistä prosesseista ilmastomuutos nostetaan välillä keskiöön.

Vaikutusarvioinneissa voidaan periaatteessa suhteuttaa kaikki vaikutukset toisiinsa erilaisten mallien ja niissä määriteltyjen indikaattorien avulla. Tällaisia malleja ovat esimerkiksi IPCC:n eli kansainvälisen ilmastopaneelin GWP-indikaattori (global warming potential), jossa kaikkien kasvihuonekaasujen ilmastovaikutus ilmaistaan suhteessa

hiilidioksidin aiheuttamaan ilmastolämpenemiseen. Vaikutusarvioinnissa joudutaankin päättämään esimerkiksi, että millä aikaskaalalla vaikutuksia halutaan tarkastella ja painottaa. Eri kasvihuonekaasuilla on erilaiset eliniät ilmakehässä ja siten niiden painoarvo ilmastolämpenemiseen on erilainen, jos lämpenemistä tarkastellaan 20 vuoden tai 100 vuoden päähän. Vaikutusten arvioinneissa pitää aina käyttää parasta tieteellistä tietoa.

Yleisesti vaikutusluokan c indikaattori I voidaan muodostaa kaavalla 1:

$$I_c = \sum_s FC_{c,s} \times m_s, \quad (1)$$

jossa s on vaikutusluokkaan kuuluva aine, m_s kyseisen aineen massa ja $FC_{c,s}$ aineen vaikutusluokkaan linkittävä karakterisointikerroin [60].

Eri vaikutusluokkien tulokset voidaan normalisoida, eli esimerkiksi suhteuttaa paikallisiin tai maailmanlaajuisiin vuosipäästöihin. Normalisoinnin jälkeenkään eri vaikutusluokkien tulokset eivät ole yhteismitallisia, koska yhden vaikutusluokan aiheuttama haitta voi olla hyvin paljon suurempi kuin toisen. Tämä voidaan ratkaista kertomalla tulokset painotuskertoimilla. Tyypillisesti käytössä olevia painotuskertoimia ovat esimerkiksi ELU- (*Environmental Load Units*) ja ReCiPe-mallit. Periaatteessa koko elinkaariarvioinnin tulos voi olla yksittäinen tunnusluku, jossa eri vaikutusluokat on laskennallisesti suhteutettu toisiinsa.

Voidaan kuitenkin kysyä, millaisessa muodossa esitetty tieto on käyttökelpoisinta tutkimuksen kannalta? Tämä voi vaihdella tutkimusten välillä esimerkiksi kohdeyleisön mukaan. Sinänsä loppupisteiden luokat ovat helposti ymmärrettävissä myös ilman asiantuntemusta. Kuitenkin loppupisteluookiin pääsemiseksi, joudutaan tekemään paljon oletuksia ja pohjalla olevat mallit ovat hyvin monimutkaisia. Näin tuotettu tieto on epävarmempaa. Ilman perehtymistä ja epävarmuuksien systemaattista tilastollista arviointia ja esitystä, maallikkoyleisö ei välttämättä saa paremmin hyödynnettävää ja ymmärrettävää kuvaa tuloksista.

ISO-standardin mukaan vaikutusluokkia voidaan myös käsitellä muilla tavoin. Vaikutusluokkia voidaan yhdistellä esimerkiksi sen mukaan ovatko vaikutukset paikallisia,

alueellisia tai maailmanlaajuisia. Vaikutusluokkia voidaan myös järjestää vaikutuksen tärkeyden mukaan.

Joskus valitaan vain yksi vaikutusluokka, jota koko tutkimus tarkastelee. Tällöin voidaan puhua esimerkiksi hiilijalanjäljestä tai vesijalanjäljestä. Jalanjälki yhden vaikutusluokan elinkaariarvio. Hiilijalanjälkilaskennat ovat yleistyneet viime vuosina ja ne voivatkin olla suosittuja, koska laskenta yksinkertaistuu merkittävästi, jos tarkastelu rajataan vain ilmastovaikutuksiin.

Toisaalta tällöin menetetään juuri elinkaariarvion alkuperäinen tavoite olla siirtämättä ympäristövaikutuksia vaikutusluokasta toiseen. Tällaiseen on päädytty esimerkiksi suosimalla dieselautoja vuoden 2007 päästöperustaisessa autoverouudistuksessa. Dieselautot kuluttavat vähemmän polttoainetta kilometriä kohden, joten niiden autovero määrittyi alemmaksi kuin bensiinikäyttöisten autojen. Nyt kuitenkin on huomattu, että dieselautojen vaikutus kaupunkien ilmanlaatuun on ollut haitallinen. Esimerkiksi Saksan joissain suurkaupungeissa ollaan kieltämässä dieselkäyttöiset autot. Vaikutus ei Suomessa ole kuitenkaan pienempien asukastiheyksien vuoksi yhtä merkittävä.

Elinkaariarvioinnissa tehtävä vaikutusten tarkastelu on aina yhteydessä arvoihin. Finnveden [64] käsittelee artikkelissaan tätä yhteyttä erityisesti vaikutusluokkien valinnan ja painotusten suhteen. Eettisen tarkastelun peruslähtökohdaksi hän ottaa joko seurauseettisen tai velvollisuuseettisen lähestymistavan ja tuo esiin, että velvollisuuseettisestä näkökulmasta elinkaariarvioinnin vaikutusluokkia ei voitaisi edes painottaa.

Velvollisuusetiikka voidaan kuitenkin tulkita myös toisin. Esimerkiksi Immanuel Kant lähtee velvollisuuseettisessä tarkastelussaan siitä, että on myös ”hypoteettisia imperatiiveja”, jotka ovat tilannesidonnaisia ja asiantuntijuuteen perustuvia eettisiä kehotuksia. Hypoteettinen imperatiivi lähtee siitä, että ”saavuttaakseen asian X, tulee tehdä A”. Sen sijaan, että velvollisuusetiikka määritteli vain ehdottomia sääntöjä, joilla ei ole painotuksia, Kantin velvollisuusetiikan lähtökohta on vapaa ja moraalinen toimija ja teon moraalisuuden määrittää pyrkimys eikä lopputulos. Finnveden tulkitsee velvollisuusetiikkaa jäykästi esittäessään, että vain seurauseettinen tarkastelu on täysin yhteensopiva elinkaariarvioinnin loppupisteluokkien painottamisen kanssa.

Finnveden tuo kuitenkin esiin tärkeitä näkökulmia. Elinkaariarvioissa arvoja ja eettisiä lähtökohtia ei useinkaan tarkastella tai tuoda esiin, vaan valinnat ovat implisiittisiä. Tämä vaikeuttaa niistä käytävää keskustelua ja toisten näkökulmien esiintuomista. On kuitenkin selvää, että elinkaariarvioiden tuottama tieto sisältää aina lähtöoletukset siitä, mikä on arvokasta ja tieto on aina siis myös poliittisen ideologian tuote.

Finnveden tuo esiin näkökulmia, joissa tulee esiin erilaisia arvotuksia. Yksi mahdollinen lähtökohta on antroposentrismi, jossa ympäröivällä luonnolla ja eläimillä on vain välinearvo ja vain ihmisellä on arvo itsessään. Tämä johtaa tietenkin vahvempaan painotukseen ihmisen hyvinvoinnille. Vaihtoehtoisia näkökulmia ovat biosentrismi, jossa elävällä luonnolla on itseisarvo ja ekosentrismi, jossa ekosysteemeillä ja ekologisilla yhteisöillä on itseisarvo. Ekologisten yhteisöjen kiertokulkujen osana toimii eloton luonto.

Myös aikaskaalan suhteen tehdään elinkaariarviointien painotuksissa valintoja. Miten suuri painoarvo annetaan tulevaisuudessa eläville sukupolville ja heihin kohdistuville haitoille? Millainen on maailmankuva suhteessa ympäröivään luontoon. Onko luonnolla joku tila, joka on arvokkaampi kuin toinen tila? Onko ihmisillä mahdollisuus vaikuttaa luonnon tilaan ja missä määrin vaikutus on ennustettavissa?

Elinkaariarviossa tiede kuvaa esimerkiksi freonien pääsyn ilmakehään ja freonien aiheuttaman epätasapainon yläilmakehän otsonikerroksessa. Mutta tiede ei varsinaisesti ota kantaa onko otsonikato haitallista tai kuinka haitallista se on. Nämä ovat eettisiä arvioita ja aina moraalisia kysymyksiä. Tiede antaa välineitä tehdä moraalisia arvioita, mutta ei tee moraalisia arvioita kenenkään puolesta.

4.5 Tulosten tulkinta

ISO-standardin mukaan ”tulosten tulkinta on elinkaariarvioinnin vaihe, jossa inventaarioanalyysin sekä vaikutusarvioinnin tai näistä jommankumman tuloksia arvioidaan suhteessa asetettuihin tavoiteisiin ja rajauksiin, jotta voidaan päästä johtopäätöksiin ja antaa suosituksia.”

Heijungs [65] jakaa tulosten tarkastelun kahteen. Toisaalta tuloksia voi arvioida toisaalta menettelytapojen osalta, toisaalta numeerisesti. Heijungsin mukaan menettelytapojen arviointi poikkeaa numeerisesta arviosta siten, että menettelytapoja arvioitaessa käytetään aina ulkopuolista dataa tai tietoa, kun taas numeeriset menetelmät käyttävät vain jo esitettyä dataa ja sitä järjestellään uudelleen tai altistetaan laskennalliselle tarkastelulle.

Heijungs listaa numeerisiksi analyyseiksi esimerkiksi:

- kontribuutioanalyysin
- häiriöanalyysin
- epävarmuustarkastelun
- vertailun
- eroavuuslaskennan

Heijungsin mukaan kontribuutioanalyysissa eri vaikutukset vain listataan niiden merkityksellisyyden mukaan tarkasteltavan kriteerin kannalta. Käytännössä kaikissa elinkaarianalyyseissä tehdään näin.

Heijungsin häiriöanalyysissa jotain mallin parametria muutetaan ja tarkastellaan kuinka paljon muutos vaikuttaa lopputulokseen. Tulos ilmoitetaan tämän muutoksen suhdeluvulla. Yleisesti Heijungsin malli vertautuu osittaisherkkyysanalyysiin. Menetelmällä saadaan selville, millä toimenpiteillä ja kehityskohteilla voidaan saada kaikkein suurimmat vaikutukset, jos tuoteprosessia lähdetään kehittämään. Menetelmällä ei kuitenkaan saada mitään tietoa tuloksiin liittyvästä epävarmuudesta tai tilastollisesta vaihtelusta.

Epävarmuusanalyysiin on paljon menetelmiä, mutta usein elinkaariarvioissa käytetään Monte Carlo-menetelmää. Siinä lähtötiedoista on tiedossa millaista todennäköisyysjakaumaa ne noudattavat ja simuloidaan tulosten todennäköisyysjakauma. Tämä tehdään ottamalla satunnaisotannalla jakaumanmukaisia lähtöarvoja ja laskemalla

niiden tuottama tulos ja toistamalla tätä esimerkiksi tuhat kertaa. Näin saadaan tuotettua arvio tulosten jakaumasta.

Tuloksia voidaan vertailla ilman epävarmuustarkasteluja, mutta tällöin mennään helposti harhaan. Lisäksi tuotevertailuja ei ikinä pitäisi esittää ilman asianmukaista epävarmuustarkastelua. Tyypillisesti vertailuväite voidaankin esittää vain tilastollisen merkitsevyyden luottamustason kautta. Vakiintunut tapa on käyttää vertailuväitteissä 5 %:n luottamustasoa.

Todellisuudessa käytetyissä lähtötiedoissa ja niihin liittyvien tilastollisten tunnuslukujen saatavuudessa on paljon vaihtelua. Voi olla, että suuresta osasta tietoa ei ole lainkaan saatavilla ja siitä joudutaan tekemään vain summittainen arvio. Tämä tietenkin vaikuttaa menetelmien soveltamiseen ja tuloksiin.

Huijbregts käsittelee väitöskirjassaan elinkaariarviointien epävarmuutta laajasti [66]. Hän erottelee toisistaan muuttujien vaihtelun ja niihin liittyvän epävarmuuden. Vaihtelussa ei ole hänen mukaansa kyse puuttuvasta tiedosta, vaan mitattujen muuttujien arvot vaihtelevat todellisuudessa ja keskiarvo ei kuvaa niitä aidosti. Tällainen muuttuja voisi esimerkiksi olla satotilasto tai kuluttajavalinnat. Huijbregts suosittelee käsittelemään elinkaariarvioinnissa muuttujaepävarmuuksia Heijungsin [67] herkkyysanalyysiin perustuvan avainmuuttujien tunnistamisen kautta.

Toisenlaisen jaottelun elinkaariarvioinnin epävarmuuksista tekee Finnveden. Hänen mukaansa epävarmuudet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. Datan epävarmuudet, kuten hiilivoimalan tuottama hiilidioksidipäästö tai sähköntuotanto
2. Valintoihin liittyvät epävarmuudet, kuten systeemin rajausta, allokatiopäätökset, funktionaalisen yksikön määrittely
3. Malliepävarmuudet, kuten käytetyn polttoaineen ja kuljetun matkan lineaarinen riippuvuus, tai typenoksidien ja happamoitumisen lineaarinen riippuvuus [68]

Näitä epävarmuuksia voi käsitellä monella tapaa. Finnveden esittää, että tulisi etsiä parempia tietolähteitä ja rakentaa parempia malleja kuvaamaan todellisuutta. Tämä ei tietenkään aina ole mahdollista. Vaikka epävarmuudet rajoittavat tuotetun tiedon sovellettavuutta ja käyttöä esimerkiksi päätöksenteossa. Usein ympäristötiedon käyttämistä päätöksenteossa ohjaa asian kiireellisyys. Esimerkiksi ilmastonmuutokseen liittyvät mallit eivät ole vuosikymmenien työstä huolimattakaan vailla epävarmuuksia. Kuitenkin sekä päätöksiä, että toimeenpanoa tulisi tehdä jo lähivuosina, jotta ilmastonmuutoksen pahimmilta seurauksilta vältyttäisiin edes jollain todennäköisyydellä [69, 70].

Matemaattisten menetelmien soveltamisessa Finnvedenin mukaan eniten edistystä on tapahtunut sumeiden menetelmien osalta ja myös bayesilaisia todennäköisyyksiä on alettu soveltaa. Näitä löytyy myös ohjelmistojen työkalupakeista ja tietokannoissa on nykyään usein saatavilla lähdeaineistona käytetty data. [68]

Valintoihin liittyvää epävarmuutta on käsitelty elinkaariarvioinneissa vähemmän kuin datan epävarmuuksia. [71] Spielman esittelee käyttötilanteeseen liittyviin epävarmuuksiin puuttuvan mallin. Sen sijaan, että tuotesysteemin käyttötilanne määriteltäisiin tietyksi ja rajattaisiin ulos muut tavat käyttää tuotetta, on käytetty myös todellisuutta paremmin kuvaavia jakaumia, joihin on sisällytetty eri käyttötilanteet ja painotettuna yleisyydellään. [72]

5 NANOSELLULOOSAN ELINKAARIARVIOT

5.1 Nanoselluloosakomposiittien elinaariarvot

Hervy et al. [73] ovat tutkineet nanoselluloosakomposiittien elinkaarenaikaisia ympäristövaikutuksia. Hervyn tutkimuksessa funktionaaliseksi yksiköksi määriteltiin suoritusindikaattori, joka kuvasi komposiittimateriaalin kimmokertoimen ja massan suhdetta. Tämä ei noudata tyypillistä elinkaariarvion funktionaalisen yksikön määrittelyä ja myöhemmin tutkimuksessa materiaalien käyttökohteeksi tarkennettiin auton paneelit. Näin materiaalien käyttöön liittyviä päästöjä voidaan vertailla. Toisaalta tällä funktionaalisen yksikön määrittelyllä päästään lähelle todellisia eroja materiaaleissa, kun ne eivät ole vielä kaupallisessa käytössä ja tyypillisille sovelluksille merkitykselliset ominaisuudet määrittävät vertailun.

Tutkimuksen rajaus tuottaa ristiriitaisia tuloksia. Esimerkiksi maissia raaka-aineena käyttävän polylaktidin katsotaan materiaalina sitovan hiiltä, mikä pitääkin paikkaansa, jos tarkastellaan cradle-to-gate-skenaariota. Mutta jos polylaktidin elinkaaren loppu otetaan huomioon, se voidaan polttaa tai se voi hapettua vapauttaen hiilidioksidia. Myöskään epäsuoria maankäyttövaikutuksia ei ole otettu tutkimuksissa huomioon. [73-75]

Tutkimuksen tärkeimmät tulokset kuitenkin olivat, että koska nanoselluloosa lisää komposiitin vetolujuutta suhteessa massaansa, se on ympäristövaikutuksiltaan kilpailukykyinen vaihtoehto ajoneuvoissa, joissa pienempi ajoneuvon massa vähentää polttoaineen kulutusta. Toisaalta nanoselluloosakomponentit valmistettiin alipainesäkitysmenetelmällä, jonka energiankulutus on merkittävä. Valmistusvaiheen osuus oli suuri nanoselluloosapaneelien ympäristövaikutuksissa. Tutkimuksessa käsiteltiin kuitenkin hyvin vähän tutkimukseen liittyviä epävarmuuksia tai olivatko tulokset tilastollisesti merkitseviä. [73]

5.2 Nanoselluloosafibrillien elinkaariarviot

Ensimmäinen nanoselluloosan tuotannosta tehty elinkaariarvio on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n SUNPAP-projektissa (*Scaling Up Nanoparticles in Modern Paper Making*) tehty elinkaariarvio. Projektin tavoitteena oli kehittää kuitupohjainen ja kierrätettävä paperi ja pakkausmateriaali, joka vähentää kaatopaikalle päätyvää jätettä ja minimoi öljypohjaisten kemikaalien käytön. Siinä käytettiin vaikutusluokkina hiilijalanjälkeä, happamoitumispotentiaali maalla, rehevöitymispotentiaali ja fossiilisten polttoaineiden ehtyminen. Tutkimus rajattiin *cradle-to-gate*-tarkasteluun. Data oli laboratoriosta ja pilottimittakaavan valmistusprosessista hankittua sekä asiantuntija-arvioita. [76]

Funktionaaliseksi yksiköksi määriteltiin massayksikkö nanofibrilloitua selluloosaa. Verrattavia menetelmiä oli kolme. Kaksi eri esikäsittelymenetelmää, entsymaattinen ja kemiallinen ja kemiallisesti esikäsittelylle kuidulle oli käytössä kaksi eri mekaanista erottelumenetelmää. Entsymaattisessa esikäsittelyssä käytettiin endoglukanaasia. Kemiallisessa esikäsittelyssä käytettiin TEMPO-hapetusta.

TEMPO-hapetuksessa selluloosa karboksyloidaan reaktiossa, jossa glukoosirenkaan C6-hiileen kiinnittynyt hydroksyyli-ryhmä hapettuu karboksyyli-ryhmäksi. Tällöin selluloosan pintavarauksesta tulee negatiivinen. [77]

Koska sähköntuotantotavat vaihtelevat maiden välillä, vertailtiin myös, millaisia laskentatuloksia saadaan, kun verrataan Suomen ja Ranskan sähköjärjestelmissä tuotettua nanoselluloosaa. Lisäksi vertailussa oli mukana latexin tuotanto.

Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta nanoselluloosan ympäristövaikutukset olivat pienempiä kaikissa vaikutusluokissa kuin latexin. Makeanveden rehevöitymisessä nanoselluloosan raaka-aineiden tuotannon kuorma oli samaa mittaluokkaa tai suurempi kuin latexin. Samoin Suomen sähköverkossa tuotetulla entsymaattisesti esikäsittelyllä nanoselluloosalla oli suurempi hiilijalanjälki kuin latexilla. Tämä johtuu siitä, että entsymaattisen esikäsittelyn jälkeen tarvitaan enemmän mekaanista työtä kuitujen erotteluun kuin TEMPO-hapetuksen jälkeen ja tuotannon sähkönkulutus oli suurempi.

Muutenkin TEMPO-hapetus oli kaikissa muissa vaikutusluokissa entsymaattista esikäsittelyä ympäristöystävällisempi paitsi vesistöjen rehevöitymisessä. Tätä selittää se raaka-aineen, eli valkaistun sulfaattisellun tuotannon rehevöittävä vaikutus oli merkittävin rehevöitymistä aiheuttava vaihe nanoselluloosan tuotannossa. Entsymaattisen käsittelyn saanto oli lähes 100 %, kun TEMPO-hapetuksessa se jää noin 70 %, jolloin raaka-ainetta tarvittiin vähemmän.

Arviot tehtiin myös niin, että funktionaalisenä yksikkönä oli tonni SBS-kartonkia, jonka päällysteestä tai esipäällysteestä oli korvattu osa latexista nanoselluloosalla. Tarkastelu rajattiin vain raaka-aineisiin ja valmistukseen tehtaan portille asti. Kaikissa vaikutusluokissa nanoselluloosan osuus lopputuotteen ympäristövaikutuksista oli mitätön. Toisaalta myös nanoselluloosan massan osuus lopputuotteen massasta oli hyvin vähäinen.

Projektissa arvioitiin myös nanoselluloosan yhteiskunnallisia ja taloudellisia vaikutuksia. Näitä arvioitiin sekä työllistämisen että arvonlisäyksen kautta.

Li et al. [77] tekivät elinkaariarvion nanoselluloosan tuotannosta laboratoriossa. Heillä oli vertailussa mukana kaksi eri kemiallista käsittelyä ja kaksi eri mekaanista käsittelyä. Näiden kaikkia neljää kombinaatiota vertailtiin. Kemialliset käsittelyt olivat TEMPO-hapetus ja kloorietikkahapolla eetteröinti. Mekaaniset käsittelyt olivat homogenointi ja sonikointi. Sonikoitu selluloosa puhdistettiin sentrifugilla. Funktionaaliseksi yksiköksi määriteltiin kuivapainoyksikkö nanoselluloosaa, koska arvio rajattiin *cradle-to-gate* -tarkasteluksi.

Elinkaariarvion vaikutusluokiksi valittiin Eco-Indicator 99 -mallin vaikutusluokat [78]. Mallissa keskipisteluokkia on 11 ja loppupisteluokkia kolme. Sonikointi kulutti energiaa ja tuotti myös ilmastopäästöjä enemmän kuin homogenointi. TEMPO-hapetetulla ja homogenoidulla nanoselluloosalla oli tutkimuksessa pienimmät ympäristövaikutukset. [77]

Laboratorion eräprosessin voi olettaa olevan huonosti skaalautuva. Piccinno et al. ovat käsitelleet skaalautuvuutta omassa tutkimuksessaan [79].

Arvion oletuksena oli, että eri menetelmin erotellun nanoselluloosan käyttömahdollisuuksissa ja soveltuvuudessa ei olisi merkityksellisiä eroja. Voi kuitenkin

olla, että esimerkiksi erot kokojakaumassa ja pintavarauksessa ja niistä johtuva erilainen käyttäytyminen jatkojalostuksessa eivät tee tuotantomenetelmistä täysin korvattavia kaikkiin käyttökohteisiin.

Arvidsson et al. [80] tutkivat nanoselluloosan tuotannon *cradle-to gate* -elinkaarivaikutuksia kolmen eri tuotantoreitin kautta. Vertailussa olivat mukana entsyymaattinen ja karboksimeetylaatio-esikäsitteily ja tuotanto ilman esikäsitteilyä. Funktionaalinen yksikkö oli yksi kilogramma nanoselluloosaa. Tutkimuksen vaikutusluokat olivat kumulatiivinen energiankysyntä, ilmastolämpenemispotentiaali, maan happamoituminen ja vedenkulutus.

Kaikissa vaikutusluokissa karboksimeetylointi esikäsitteilynä tuotti moninkertaiset ympäristövaikutukset koko elinkaaren ajalta verrattuna muihin reitteihin. Tätä selitti suuri kemikaalien kulutus prosessissa, joka oli luokkaa 30 kg etanolia, metanolia ja isopropanolia yhtä tuotettua nanoselluloosakilogrammaa kohti [80]. Erityisesti kumulatiivisen energiankulutuksen vaikutusluokassa tämä oli tuloksena mielenkiintoinen, koska esikäsitteilyä on kehitetty juuri tuotannon energiankulutuksen vähentämiseksi. Tutkimuksessa ei havaittu suurta eroa endoglukanaasilla suoritetun entsyymaattisen esikäsitteilyn ja pelkän mikrofluidisaation ympäristövaikutusten välillä. Verrattuna Li et al. laboratoriomittaluokan energiankulutusarvioihin tutkimuksessa päästiin huomattavasti pienempään kokonaisenergiankulutukseen. [77, 80]

Herkkyysanalyysissa tarkasteltiin erilaisia vaihtoehtoja raaka-aineena käytetyn selluloosan tuotannossa, käsittelyn energiankulutuksessa, kuljetuksessa, etanolin tuotannossa, sähköntuotantotavoissa, lämmöntuotannossa ja liuotinten poltossa lämmöksi sekä materiaalin talteenotossa ja kierrätyksessä. Tuloksissa eri nanoselluloosan tuotantotapojen ympäristövaikutukset säilyivät samoina suhteessa toisiinsa. Karboksimeetylointireitillä oli edelleen suurimmat vaikutukset. Entsyymaattisen esikäsitteilyn ja ilman esikäsitteilyä tuotetun nanoselluloosan suhteen erot olivat pieniä. Tulosten perusteella liuotinten kierrätys voisi alentaa karboksimeetyloidun nanoselluloosan ympäristövaikutuksia [80].

Nascimento et al. [81] tuottivat nanokiteistä selluloosaa kookospähkinän kuorijätteestä. Jäte syntyy, kun kookospähkinästä käytetään hedelmä ja sillä ei ole tutkimuksen mukaan aiemmin ollut muita hyödyntämisreittejä. Tuotantotapoja oli neljä: rikkihappohydrolyysi

kahdella eri hapon laimennuksella, hapetus ammoniumpersulfaatilla ja sonikointi. Happohydrolyysia ja sonikointia ennen massa myös valkaistiin [82]. Myös ligniini otettiin talteen ja sen hyödyntämisen elinkaarivaikutuksia tutkittiin arvioissa.

Vaikutusluokkia tutkimuksessa olivat: ilmastonmuutos, happamoituminen, makeanveden ja meriveden rehevöityminen, myrkyllisyys ihmisille ja vedenkäyttö. Funktionaalisena yksikkönä oli massayksikkö nanokiteistä selluloosaa. Tutkimuksessa havaittiin, että sähkönkulutus ja etikkahapon tuotanto ovat selluloosananokiteiden tuotannossa kriittiset vaiheet ympäristövaikutuksien kannalta.

Tutkimuksessa sonikoinnin havaittiin olevan kaikissa vaikutusluokissa vähiten ympäristölle haitallinen valmistusmenetelmä. Tähän vaikutti ehkä eniten se, että menetelmällä oli paras saanto. Saanto oli yli kaksinkertainen väkevällä hapolla tehdyn happohydrolyysin saantoon verrattuna. [81]

Tulos oli mielenkiintoinen, koska Li et al. [77] tutkivat sonikointia nanoselluloosakuitujen valmistuksessa ja mikrofluidisaatio aiheutti heidän tutkimuksessaan pienemmän ympäristöhaitat. Nascimento et al. toteavatkin, että mikrofluidisaation ja sonikoinnin yhdistelmällä tuotetun nanokiteisen selluloosan ympäristövaikutukset voisivat olla tutkittua vielä vähemmän haitalliset.

Samoin Nascimento et al. eivät tutkineet entsymaattisia erottelumenetelmiä, jotka Arvidsson et al. [80] olivat havainneet kemiallisia erottelumenetelmiä tehokkaammiksi. Nascimento et al. ei kuitenkaan omassa tutkimuksessaan erotellut nanokiteistä ja nanofibrilloitua selluloosaa, vaan viittasi Li et al. ryhmän tutkineen myös selluloosananokiteitä, vaikka he itse määrittelevät tuottamansa materiaalin nanoselluloosakuiduiksi [77, 81].

Vaikka sonikointi tuotti ympäristövaikutuksiltaan myönteisen tuloksen, tutkimuksessa huomautetaan, että tuotettu nanokiteinen selluloosa oli rakenteeltaan heterogeenistä ja sen taipumus aggregoitua oli voimakkaampi kuin vertailun muilla menetelmillä tuotettu nanokiteinen selluloosa.

5.3 Nanoselluloosan tuotannon mittakaava ja elinkaarivaikutukset

Nanoselluloosasta on edelleen melko vähän kaupallisia sovelluksia perinteisen paperiteollisuuden ulkopuolella. Elinkaariarvioita on tehty etupäässä laboratoriomittakaavan nanoselluloosatutannosta. Tästä on hyötyä, koska näin voidaan jo aikaisessa vaiheessa tunnistaa keskeiset ympäristövaikutukset ja kehittää erityisesti niitä tuotantovaiheita, joiden vaikutukset ovat isoimmat. Toisaalta elinkaariarvioissa tehdään vertailuja muihin materiaaleihin, jotta pystyttäisiin paremmin perustelemaan nanoselluloosan potentiaali muiden materiaalien korvaamisessa. Näissä vertailuissa saadut tulokset eivät aina ole olleet nanoselluloosalle edullisia. On kuitenkin ilmeistä, että laboratoriomittakaavan valmistusprosessi ei skaalaudu lineaarisesti teolliseen tuotantoon. Pitkään markkinoilla olleet teknologisesti kypsät materiaalit saavat näissä vertailuissa merkittävän etumatkan.

Tyypillisesti laboratoriomittakaavan tuotannossa ei resurssitehokkuus ole optimoitua [83]. Esimerkiksi energiantuotannossa voidaan teollisessa tuotantoprosessissa hyödyntää toisten tuotantovaiheiden hukkalämpöä. Sama ei useinkaan ole mahdollista laboratorioolosuhteissa, jossa prosessin eri vaiheet eivät suoraan seuraa toisiaan.

Piccinno et al. [83] ovat kehittäneet mallin kemiallisten eräprosessien mittakaavamuutoksiin (*scale-up*) *cradle-to-gate*-elinkaariarvioinneissa. Mallissa otetaan pohjaksi laboratorion työprosessi, mutta rakennetaan sen pohjalta yksinkertaistettu tuotantolaitoksen prosessikaavio ja lasketaan jokaiselle vaiheelle erillinen arvio tuotantovaiheen tarvitsemista ja tuottamista panoksista. Piccinno et al. [79] käyttivät mallinsa testaamiseen porkkanoista erotettua nanoselluloosaa. Raaka-aine käsiteltiin entsyymaattisesti ja homogenoitiin. Kuidut päällystettiin kopolymeri GripX:llä, jossa on primäärisiä amiiniryhmiä kitosaanirungossa ja ksyloglukaanista muodostuvia sivuketjuja. Lopputuotteena oli märkäkehrättyjä kuituja.

Piccinnon mittakaavatutkimuksessa käytettiin ReCiPe mallin mukaisia vaikutusluokkia. Vaikutuksia tutkittiin sekä keskipiste- että loppupistemallinnuksella. Tutkimukseen rakennettiin erilaisia prosesseja, joita vertailtiin. Suurimmat erot saatiin GripX:n tuotantotapojen välille. GripX:n tuotannossa käytetään paljon liuottimia ja suurimmat ympäristövaikutukset muodostuivat, jos liuottimella ei olisi prosessissa mitään uudelleenkäyttöä. Tutkijat olivat laboratoriotutkimuksissaan saaneet tulokseksi, että

entsymaattinen kuitujen erottelu on prosessin ympäristövaikutuksiltaan merkittävin vaihe. Tämä ei teollisen tuotantoprosessin mallissa enää pitänytkaan paikkaansa, vaan entsymaattisen käsittelyn lämpöhäviöiden laskettiin teollisessa reaktorissa olevan pieniä ja hukkalämpö oli mahdollista ottaa talteen.

Eroja Piccinnon [79] tutkimuksessa saatiin myös raaka-aineiden välille. Tutkimuksessa havaittiin, että ympäristövaikutukset kasvoivat, jos nanoselluloosa tuotettiin kokonaisista porkkanoista eikä porkkanamehun puristamisesta jäljelle jääneestä ruokajätteestä. Erityisesti tämä vaikutti kuljetettavan massan kasvaessa kuljetuksesta aiheutuviin päästöihin sekä reaktoreiden kokoon ja näin ollen lämpöhäviöihin että massan lämmittämiseen tarvittavaan energiamäärään. Johtopäätös oli, että erityisesti ruokajätteestä tuotettu nanoselluloosa kannattaa prosessoida mahdollisimman lähellä jätteen lähdettä, jotta tuotannosta saadaan kannattavaa ja ympäristöystävällistä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

On havaittavissa paljon yhteiskunnallisia muutoksia, jotka voivat johtaa sekä pakkausmateriaalin kysynnän lisääntymiseen että pakkausteknologioiden merkityksen kasvuun ruuanjakeluketjussa. Keskeisiä muutostekijöitä ovat ilmastomuutos ja väestönkasvu ja näiden vaikutus ruuan hintaan sekä teknologiset muutokset.

On mahdollista, että ilmastomuutoksen ja ilmastopolitiikan vuoksi globaalit jakeluketjut lyhentyvät. Näin voi tapahtua, jos liikennepolttoaineiden hinta kasvaa ja olosuhteista, joissa rahteja kuljetetaan, tulee epävarmempia [84]. Valtioneuvoston selonteossa ruokapolitiikasta Ruoka2030 lähdetään kuitenkin siitä, että Suomessa ruuan jakeluketjut pysyvät monimuotoisina ja niiden ympärille kasvaa erilaisia palvelukonsepteja [85].

Niukkuuden ja kiertotalouden maailmassa pakkausmateriaalit kilpailevat raaka-aineista muun teollisuuden kanssa. Kierrätettävyys ja uusiokäyttö nostavat merkitystään tulevaisuudessa. Nanoselluloosan energiantensiivisyydessä on vielä matkaa siihen, että se korvaisi laajamittaisesti muoveja. Pakkausmateriaalit ovat yleensä bulkkituotteita, joiden jalostusarvo ei nouse kovin korkeaksi.

Nanoselluloosan kyky parantaa materiaalien lujuusominaisuuksia on hyödyllinen pakkausteknologiassa. Tämä mahdollistaa pakkauksen massan pienentämisen, jolla on vaikutukset myös kuljetusten energiankulutukseen. Samoin pakkausmateriaalin raaka-ainekustannukset pienenevät, kun saman lujuuden saavuttamiseen tarvitaan vähemmän raaka-aineita. Vaikka nanoselluloosalla voidaan parantaa materiaalien ominaisuuksia, sen hinta voi olla este joissain niin matalan jalostusasteen tuotteissa kuin pakkausmateriaalit. Nykyinen muoveja vastustava ilmapiiri voi kuitenkin muuttaa markkinatilannetta uusiutuville materiaaleille suotuisaksi, jos Euroopan Unionin muovistrategian tavoitteita aletaan panna toimeen lainsäädännön keinoin. Toisaalta yleinen mielipide vaikuttaa myös nanomateriaalien hyväksyntään [86, 87].

Nanoselluloosan hyödyllisyys ja käyttökelpoisuus ei ole kiinni vain lujuusominaisuuksista. Erityisesti barrier-ominaisuudet voivat olla pakkaustekniikan kannalta tärkeimpiä. Ruuan säilyvyyden pidentäminen on helposti kustannustehokasta. Kun otetaan huomioon, että

kuluttajat globaalissa pohjoisessa ovat useissa kuluttajaryhmissä entistä terveystietoisempia ja etsivät ”puhtaampaa” ruokaa, voi säilyvyys ilman säilöntäaineiden lisäämistä olla avaintekijä nanoselluloosakalvojen käytössä. Erityisesti kuitumateriaalien päällysteissä ja yhdistelmäateriaaleissa nanoselluloosan vahvuudet pääsevät esiin.

Nanoselluloosan uudelleenkäytettävyys ei ole yhtä suoraviivaista kuin useiden pakkausmuovilaatujen. Jos nanoselluloosakalvo on yhdistelmäateriaalin osana, se voi kuitumateriaalin osana helpottaa materiaalikierrätystä suhteessa muovipäällysteisiin, jos kalvon muut osat ovat vesiliukoisia. Toisaalta muovipakkauksen osana se heikentää materiaalin kierrätettävyyttä. Myös biohajoavuus on kiinni kokonaisuudesta.

Nanoselluloosan sovelluskohteet ovat tällä hetkellä suurimmaksi osaksi perinteisessä paperiteollisuudessa. Kuitupakkaukset ovatkin tällä hetkellä nanoselluloosan keskeinen vaikutus elintarvikepakkauksiin. Näissä sovelluksissa nanoselluloosan suhteellinen ympäristövaikutus voi olla melko vähäinen, koska sen osuus pakkausten kokonaismassasta on yleensä melko vähäinen. Aiheesta tarvitaan kuitenkin lisää tutkimusta.

Pakkauksen funktioiden näkökulmasta kuitupakkausten lisäaineena käytetyllä nanoselluloosalla on vaikutusta kaikkiin pakkausfunktioihin. Fyysisten ominaisuuksien osalta tämä on ilmeistä, mutta nanoselluloosa vaikuttaa myös tiedonvälitysominaisuuksiin, vaikuttaen pakkausten painettavuuteen.

Potentiaalia nanoselluloosan uusille käyttökohteille olisi esimerkiksi kalvoissa ja niin sanotuissa funktionaalisissa pakkauksissa. On kuitenkin vaikea arvioida millaisia ympäristövaikutuksia nanoselluloosan käytölle olisi näissä käyttökohteissa. Vielä kehitteillä olevien tai uusien sovellusten elinkaariarvioinnissa on haasteita. Ongelmia tuottavat:

- funktionaalisen yksikön määrittely
- datan kerääminen ja luotettavuus
- tuotannon mittakaavan kasvattamisen vaikutukset resurssien kulutukseen

- vertailu vanhoihin tuotteisiin ja sovelluksiin. [80]

Kirjallisuudessa ei tähän mennessä juuri ole julkaistu elinkaariarvioita, joissa olisi tarkasteltu nanoselluloosasta valmistettujen tuotteiden käytön, kierrätyksen, uudelleenkäytön, hylkäämisen tai muita elinkaaren loppuvaiheita. Tähän työhön on saatu mukaan yksi, joka tarkastelee myös käyttövaihetta [73]. Tämä on tyypillistä teknologialle, jolla on useita eri käyttökohteita, joista osa on vielä tuotekehitysvaiheessa.

Tämä kuitenkin vaikeuttaa nanoselluloosan etujen arvioimista suhteessa vaihtoehtoisin materiaaleihin. Kun materiaaleilla on erilaiset fyysiset ominaisuudet ja erilaiset vaikutukset pakkauksen fyysisiin ominaisuuksiin, *cradle-to-gate* -elinkaariarvioissa käytetty funktionaalinen yksikkö, kilogramma tai tonni tuotetta, ei tuota mahdollisuutta vertailla käyttökohteita. Tämän tekee ongelmalliseksi sekin, että Hervy et al. [73] saivat tutkimuksessaan tulokseksi, että suurempi pitoisuus nanoselluloosaa komposiitissa, pienensi koko elinkaarenaikaisia päästöjä.

Vaikka elinkaarivaikutuksia elinkaaren loppuvaiheesta on tutkittu vain vähän, on eri tutkimuksissa selvitetty tuotteiden biohajoavuutta [76], myrkyllisyyttä soluille [88] ja ekotoksisuutta [89]. Näissä on havaittu vähäisiä tai ei lainkaan myrkyllisyyttä. Selluloosa on biohajoavaa, mutta myös TEMPO-hapetetun nanoselluloosan biohajoavuus on osoitettu standardinmukaisissa testausolosuhteissa. Potentiaalinen vaara ihmisille on, että selluloosananokiteet hengitettynä aiheuttavat ongelmia hengitysteissä ja keuhkoissa [90].

Käyttötarkoitus vaikuttaa siihen, millaisia ominaisuuksia nanoselluloosalla pitää olla. Esimerkiksi jos halutaan valmistaa läpinäkyvä kalvo, nanoselluloosakuitujen pitää olla riittävän ohuita ja irti toisistaan. Riittävä erottelu voidaan saada aikaan kemiallisilla tai entsyymaattisilla esikäsittelyillä, mutta myös mekaanisen erottelun aikaa käsittelykertoja tai -aikaa voidaan lisätä, jolloin esimerkiksi pelkällä mikrofluidisoinnilla saadaan eroteltua kuidut niin, että tuotteesta saadaan läpinäkyvä [80].

Mikrofluidisointi kuluttaa kuitenkin paljon energiaa. Eri vaihtoehtojen välillä voidaan kuitenkin löytää optimeja esimerkiksi ympäristövaikutusten ja eri menetelmien väliltä suhteessa tavoitteisiin. Paras mahdollinen menetelmä voi myös olla riippuvainen

tuotantopaikasta, koska esimerkiksi energiantuotanto ja muiden tuotantopanosten tuotanto poikkeaa maasta toiseen ja toisaalta vaikutukset vastaanottavat ympäristöt ovat herkkyydeltään erilaisia. Vaikutuksensa on myös kuljetusmatkojen minimoinnilla.

Nanoselluloosan elinkaariarvioinneissa ei saatu yksiselitteisiä viitteitä siitä, että nanoselluloosan käyttö pakkausmateriaaleissa vaikuttaisi pakkausten elinkaarivaikutuksiin positiivisesti. Toisaalta elinkaariarvioinneissa ei myöskään käsitellä tätä kysymyksenasettelua suoraan. Kyse on paljon myös vertailukohdasta ja käytetystä datasta ja sen vertailtavuudesta. Esimerkiksi latexin korvaamisesta nanoselluloosalla saatiin SBS-kartongin kohdalla ympäristön kannalta hyvin pieniä positiivisia viitteitä, mutta tulokset eivät olleet millään tapaa tilastollisesti merkitseviä ja raporttia ei edes ollut tieteellisesti vertaisarvioitu [76].

Vertausarvioituissa artikkeleissa voitiin havaita, että tuloksiin vaikutti erityisen paljon tutkimusasetelma. Tämä on tyypillistä elinkaariarvioinnille. Datan hankinta, primääri- ja sekundaaridatan käyttö ja tarkasteltavien tuotantotapojen mittakaava vaikuttivat paljon. Mittakaavalla tarkoitetaan tässä nanoselluloosan tuotantoa laboratoriossa sen sijaan, että sitä tuotettaisiin teollisessa tai edes pilottimittakaavassa. Samoin rajaukset sen suhteen, että mitä tuotantoprosessiin laskettiin kuuluvan, vaihtelivat tutkimuksesta toiseen. Tutkimuksissa myös tulosten luotettavuutta ja herkkyyksiä tarkasteltiin vaihtelevasti.

7 YHTEENVETO

Työssä selvitettiin ruokapakkausten kehityskulkujen ajureita ja pakkaustekniikan perusteita. Käytiin läpi keskeisiä yhteiskunnallisia muutosvoimia ja niiden vaikutuksia ruuan jakeluketjuun ja toisaalta pakkausten tuotantoon.

Ruuan kulutuksen tavat muuttuvat hitaasti. Kuitenkin ilmastonmuutos, kaupungistuminen, nousevat tulotasot ja pienevät taloudet vaikuttavat ruuankulutukseen ja pakkauksiin kohdistuviin odotuksiin. Ruuan hinnan odotetaan nousevan ja ruokahävikin merkityksen kasvavan. Tämä nostaa odotuksia myös ruokapakkauksia kohtaan ja ruokapakkausten vaikutus hävikkiin korostuu entisestään. Pakkaamisesta tulee myös taloudellisesti kannattavampaa, jos hävikki vähenee tarkoituksenmukaisen pakkauksen vuoksi.

Ruokahävikin vähentäminen on noussut keskeiseen rooliin ilmastonmuutoksen hillinnän ja sopeutumisen tavoitteissa. Lisää tutkimusta sopeutumismahdollisuuksista ilmastonmuutokseen tulisi tehdä ruuan prosessoinnin, pakkaamisen, kuljetuksen, saavutettavuuden, säilytyksen ja kaupan osalta.

Ilmastonmuutoksen lisäksi kaupungistuminen ja väestönkasvu vaikuttavat tutkimusten mukaan sekä ruuan tuotantoon että kulutukseen. Vaikka globalisaatio on kasvattanut jakeluketjujen pituutta, on mahdollista, että tulevaisuudessa kehitys kääntyy toiseen suuntaan. Tämä vaikuttaa myös ruoan pakkaamiseen ja pakkaukseen kohdistuviin vaatimuksiin. Lisäksi ruoan hankintaan ja kulutukseen vaikuttaa ihmisten tulotaso ja monet sosiaaliset rakenteet. Pakkauksilla vastataan ihmisten muuttuviin tarpeisiin esimerkiksi pakkauskokojen kautta.

Tutkimuksessa tarkasteltiin pakkauksen funktioita pakkausteknologiassa. Pakkauksella on useita funktioita, jotka liittyvät toisaalta tuotteen suojaamiseen, tuotteen käsittelyyn ja tiedonvälitykseen. Todettiin, että funktiot ovat toisiaan leikkaavia ryhmiä ja usein tukevat toisiaan.

Diplomityössä käytiin läpi elinkaariarvioinnin nykytilaa ja parhaita käytäntöjä. Selvitetiin, miten elinkaariarviointi on kehittynyt ja millaisen arvomaailman sisällä arvioita tehdään.

Lisäksi selvitettiin, millaisia menetelmiä elinkaariarvioilla saavutetun tiedon luotettavuuden arviointiin on kirjallisuudessa esitetty.

Viimeisissä luvuissa käytiin läpi nanoselluloosan tuotannon elinkaariarvioita. Tällä hetkellä elinkaariarvioita ei ole vielä kuin raaka-aineiden ja tuotannon osalta. Elinkaaren loppuvaiheita käsiteltiin vain yhdessä elinkaariarviossa, jossa ei kuitenkaan käsitelty pakkaustekniikkaa vaan nanoselluloosakomposiitin käyttämistä auton osissa. Tässä tutkimuksessa saatiin tulokseksi, että nanoselluloosan käyttövaihe vaikuttaa ympäristövaikutuksiin merkittävästi liikennesovelluksessa ja että nanoselluloosapitoisuuden lisääminen komposiitissa parantaa tuloksia entisestään.

Nanoselluloosan tuotannon keskeisiä ympäristövaikutuksia ovat energiankulutukseen liittyvät päästöt, kuten ilmastomuutospotentiaali. Toisaalta joissain tutkimuksissa merkittävimmät ympäristövaikutukset muodostuivat esikäsitteilyissä käytettävien kemikaalien tuotannosta. Elinkaariarvioiden vertailussa saatiin viitteitä siitä, että TEMPO-hapetus tai entsyymaattiset käsittelyt voivat olla edullisia tuotantoreittejä ympäristövaikutusten osalta. Toisaalta eri reittejä valmistetut nanoselluloosakuidut ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, joten loppukäyttösovelluksen vaatimukset pitäisi paremmin huomioida vertailujen lähtökohtina. Siksikin käyttövaiheen puuttuminen on estää kokonaisvaltaisen vertailun kirjallisuuden perusteella.

Selvitettiin myös tuotantomittakaavan vaikutusta nanoselluloosan ympäristövaikutuksiin. Kirjallisuudessa on esitetty laskentamallia, jossa otetaan huomioon minkä tuotantovaiheiden ympäristövaikutukset muuttuvat, kun tuotannon mittakaava kasvaa. Esimerkiksi lämpöhäviöitä voidaan merkittävästi vähentää ja hukkalämmön hyödyntämistä voidaan lisätä suuremman mittakaavan tuotannossa. Mallin laskentatuloksissa nanoselluloosan tuotannon energiantensiivisyys vähenee, kun tuotantomittakaava kasvaa. Energiantensiivisyys on ollut nanoselluloosamateriaalien keskeisin ongelma ympäristövaikutusten ja myös kustannusten kannalta.

Toisaalta voidaan odottaa, että tuotantotavat kehittyvät myös muilta osin, kun teknologia kypsyy. Kuitenkin jo nykyisissä selvityksissä saadaan viitteitä, että esimerkiksi latexin korvaaminen nanoselluloosalla vähentää tuotteen ympäristövaikutuksia. Oleellisia

kysymyksiä ovat nanoselluloosan tuotantomenetelmien ja käytön optimointi suhteessa materiaalilta vaadittaviin ominaisuuksiin ja toisaalta ympäristövaikutuksiin. Keskeistä on myös selluloosaraaka-aineen tuotanto: käytetäänkö esimerkiksi jätejakeita tai kuljetetaanko niitä pitkiä matkoja. Erityisesti ilmastonmuutospotentiaalissa korostuu raaka-aineen ja alkutuotannon merkitys. Toisaalta elinkaaren loppupäätä eli nanoselluloosasta valmistettujen tuotteiden uusiokäyttöä tai kierrättämistä ei tässä työssä päästy tarkastelemaan.

Myös erilaiset tutkimusasetelmat vaikeuttavat tutkimusten vertailtavuutta ja niillä on erityisen suuri vaikutus elinkaariarvioiden tuottamiin tuloksiin. Datan hankinnan, rajausten ja tuotannon mittakaavojen vaihtelu tutkimusten välillä olivat keskeisiä vertailtavuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Muovikalvojen korvaajana nanoselluloosan ominaisuudet voivat tukea tavoitteita hävikin vähentämisessä, koska kaasujen läpäisevyys voi pidentää elintarvikkeiden säilyvyyttä. Tuotteen säilyminen käyttökelpoisena on ympäristön kannalta yleensä tärkeämpää kuin pakkauksen ympäristövaikutus itsessään. Toisaalta juuri kalvojen kohdalla nanoselluloosan ominaisuudet tuottavat haasteita, koska niissä nanoselluloosan hydrofiilisuus tulee esiin, jos kalvo on suorassa kontaktissa kosteisiin ruoka-aineisiin. Toisaalta läpinäkyvyyden saavuttamiseksi nanoselluloosan tulee olla hyvin eroteltua. Tällöin tuotannon energiaintensiivisyys ja kemikaalien käyttö voi olla suurempaa kuin esimerkiksi lisäaineeksi kelpaavan nanoselluloosan kohdalla.

Tässä tutkimuksessa päädyttiin siihen, että nanoselluloosan käyttämiseen pakkauksissa on monia ympäristönäkökohtia. Lisäaineena se lisää pakkausmateriaalin lujuutta, jolloin raaka-aineita saman lujuuden tuottamiseksi pitää käyttää vähemmän ja näin tuotantokustannukset pienenevät ja myös ympäristövaikutukset mahdollisesti vähenevät. Ruoantuotannon ympäristövaikutuksia tulee kuitenkin tarkastella koko tuotanto- ja jakeluketjun matkalta, jossa pakkausmateriaali on vain pieni osa kokonaisuutta.

LÄHDELUETTELO

1. Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schöneich-Argent, R., Brambini, R. ja Reisser, J., Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is Rapidly Accumulating Plastic, *Sci Rep* **8**(2018)1, s. 1-15.
2. Gustafsson, K., Gustafsson, K., Jönson, G., Smith, D. ja Sparks, L., *Retailing Logistics and Fresh Food Packaging: Managing Change in the Supply Chain*, Kogan Page, Lontoo 2006.
3. Johansson, L., Tammelin, T., Campbell, J. M., Setälä, H. ja Österberg, M., Experimental Evidence on Medium Driven Cellulose Surface Adaptation Demonstrated using Nanofibrillated Cellulose, *Soft Matter* **7**(2011)22, s. 10917-10924.
4. *Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial Text with EEA relevance*, 2011, [viitattu: 13.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<http://data.europa.eu/eli/reco/2011/696/oj/eng>].
5. Siro, I. ja Plackett, D., Microfibrillated Cellulose and New Nanocomposite Materials: A Review, *Cellulose* **17**(2010) s. 459-494.
6. Pöhler, T. ja Lappalainen, T. ja Tammelin, T. ja Eronen, P. ja Hiekkataipale, P. ja Vehniäinen, A. ja Koskinen, T., M., *Influence of Fibrillation Method on the Character of Nanofibrillated Cellulose (NFC)*, 2010 TAPPI International Conference on Nanotechnology for the ForestProduct Industry, 27-29.9.2010. Espoo, Finland.
7. Csiszar, E., Kalic, P., Kobol, A. ja Ferreira, E. d. P., The Effect of Low Frequency Ultrasound on the Production and Properties of Nanocrystalline Cellulose Suspensions and Films, *Ultrasonics Sonochemistry* **31**(2016) s. 473-480.

8. Qiu, Y., Qiu, L., Cui, J. ja Wei, Q., Bacterial Cellulose and Bacterial Cellulose-Vaccarin Membranes for Wound Healing, *Materials Science and Engineering: C* **59**(2016) s. 303-309.
9. Paine, F. A., *Introduction*, Teoksessa: Paine, F. A. (toim.), The Packaging User's Handbook, Boston, MA 1991, Springer US, s. 3-22.
10. Emblem, A., *Packaging Functions*, Teoksessa: Emblem, A. ja Emblem, H. (toim.), Packaging technology – Fundamentals, materials and processes, Philadelphia, USA 2012, Woodhead Publishing Limited, s. 24–49.
11. Lindh, H., Williams, H., Olsson, A. ja Wikström, F., Elucidating the Indirect Contributions of Packaging to Sustainable Development: A Terminology of Packaging Functions and Features, *Packaging Technology and Science* **29**(2016)4-5, s. 225-246.
12. Emblem, A., *Packaging and Society*, Teoksessa: Emblem, A. ja Emblem, H. (toim.), Packaging technology – Fundamentals, materials and processes, 2012, Woodhead Publishing Limited, s. 3–9.
13. Dados, N. ja Connell, R., The Global South, *Contexts* **11**(2012)1, s. 12-13.
14. Gray, K. ja Gills, B., South–South Cooperation and the Rise of the Global South, *Third World Quarterly* **37**(2016) s. 557-574.
15. Innis, G. R., *The Packaging Supply Chain*, Teoksessa: Emblem, A. ja Emblem, H. (toim.), Packaging technology – Fundamentals, materials and processes, Philadelphia, USA 2012, Woodhead Publishing Limite, s. 10-23.
16. Yam, K., Takhistov, P. ja Miltz, J., Intelligent Packaging: Concepts and Applications, *Journal of Food Science* **70**(2005)1, s. R1–R10.

17. Huhtakangas, P., *Tullilaboratorio tuotevääreennösten jäljillä*, 2012, [viitattu: 3.8.2018]
Saataavilla WWW-muodossa: [<http://kehittyvaelintarvike.fi/teemajutut/tullilaboratorio-tuotevaareennosten-jaljilla>].
18. Farmer, N., *Packaging and Marketing*, Teoksessa: Emblem, A. ja Emblem, H. (toim.),
Packaging Technology – Fundamentals, Materials and Processes, Philadelphia, USA
2012, Woodhead Publishing Limited, s. 87–106.
19. T. Flink, Campbell Soup Company to Develop More Plant-Based Protein Options, 14.3.
2018, [viitattu 2.8.2018], Saataavilla WWW-muodossa:
[<https://www.livekindly.co/campbell-soup-company-develop-plant-based-protein-options/>].
20. Anonyymi, Own a Warhol for just 75 cents: Campbell's soup to launch limited edition
Andy Warhol-inspired cans at Target, [viitattu 2.8.2018] Saataavilla WWW-muodossa:
[<http://www.dailymail.co.uk/news/article-2195347/Andy-Warhol-Campbells-soup-launch-limited-edition-inspired-cans-Target-stores.html>].
21. Anonyymi, *Elintarviketieto-opas elintarvikevalvojille ja elintarvikealan toimijoille*
"Pakkausmerkintäopas", 2015 [viitattu 30.7.2018] Saataavilla WWW-muodossa:
[<https://www.evira.fi/tietoa-evirasta/julkaisut/elintarvikkeet/opaat/elintarviketieto-opas-elintarvikevalvojille-ja-elintarvikealan-toimijoille/>].
22. Wikström, F., Verghese, K., Auras, R., Olsson, A., Williams, H., Wever, R., Grönman,
K., Kvalvåg Pettersen, M., Møller, H. ja Soukka, R., Packaging Strategies that Save
Food: A Research Agenda for 2030, *Journal of Industrial Ecology* 0(2018)0.
23. Anonyymi, Agenda2030 - kestävä kehityksen tavoitteet, [viitattu 17.10.2018]
Saataavilla WWW-muodossa: [<https://www.yk.fi/node/479>].
24. Heller, M. C., Selke, S. E. M. ja Keoleian, G. A., Mapping the Influence of Food Waste
in Food Packaging Environmental Performance Assessments, *Journal of Industrial Ecology* 0(2018)0.

25. Fadiji, T., Berry, T. M., Coetzee, C. J. ja Opara, U. L., Mechanical Design and Performance Testing of Corrugated Paperboard Packaging for the Postharvest Handling of Horticultural Produce, *Biosystems Engineering* **171**(2018) s. 220-244.
26. Singh, J. & Singh, S.P., *Damage Reduction to Food Products during Transportation and Handling*, Teoksessa: Kutz, M. (toim.), Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery, William Andrew Publishing, s. 705.
27. Rumerman, M. L. ja Ostrem, F. E., *Shock and Vibration. Transportation Environmental Criteria Final Report*, NASA Center for AeroSpace Information (CASI), 1965.
28. Crompton, G., *Packaging Machinery and Line Operations*, Teoksessa: Emblem, A. ja Emblem, H. (toim.), Packaging technology – Fundamentals, materials and processes, Philadelphia, USA 2012, Woodhead Publishing Limited, s. 490 – 537.
29. Mori, S., Kato, M. ja Ido, T., GISELA - GIS-Based Evaluation of Land use and Agriculture Market Analysis Under Global Warming, *Applied Energy* **87**(2010) s. 236-242.
30. Porter, J. R. ja Xie, L., *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Chapter 7 Food Security and Food Production Systems*, 2014 [viitattu 23.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap7_FINAL.pdf].
31. Anonymi, *The future of food and agriculture - Trends and challenges*, Rooma, 2017 [viitattu 13.6.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>].
32. Anonymi, *FAO's role in Urban Agriculture*, [viitattu 13.6.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<http://www.fao.org/urban-agriculture/en/>].

33. Anonyymi, Small Farmers and Urban Agriculturalists - Fact Sheet, [viitattu 13.6.2018]
Saatavilla WWW-muodossa:
[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1083296.pdf].
34. Brown, M. J., Dicks, L. V., Paxton, R. J., Baldock, K. C., Barron, A. B., Chauzat, M. P., Freitas, B. M., Goulson, D., Jepsen, S., Kremen, C., Li, J., Neumann, P., Pattemore, D. E., Potts, S. G., Schweiger, O., Seymour, C. L. ja Stout, J. C., A Horizon Scan of Future Threats and Opportunities for Pollinators and Pollination, *PeerJ* **4**(2016) s. 1-20.
35. Zomer, R., A. Bossio, D., Sommer, R. ja Verchot, L., Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils, *Sci Rep* **7**(2017)1, s. 1-8.
36. Anonyymi, Suot ja ilmasto, [viitattu 22.6.2018] Saatavilla WWW-muodossa:
[<https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsat-ja-ilmastonmuutos/soiden-erityinen-kasvihuonevaikutus/>].
37. Anonyymi, *The State of Food Insecurity in the World - Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition*, Rooma, 2012
[viitattu 14.6.2018] Saatavilla WWW-muodossa:
[<http://www.fao.org/docrep/016/i3027e/i3027e.pdf>].
38. Chau, K. W., Ming Li, F., Leung, D. K. C., Tang, G. W. K., Wong, S. K., Ye, A. L., Baharuddin ja Lau, S. S. Y., Compromising Building Regulations and User Expectations in the Design of High-rise Domestic Kitchens, *Structural Survey* **24**(2006)3, s. 212-229.
39. Ma, H., Huang, J., Fuller, F. ja Rozelle, S., Getting Rich and Eating Out: Consumption of Food Away from Home in Urban China, *Canadian Journal of Agricultural Economics* **54**(2006)1, s. 101-119.
40. Maruapula, S. D., Jackson, J., Holsten, J., Shaibu, S., Malete, L., Wrotniak, B., Ratcliffe, S., Mokone, G., Stettler, N. ja Compher, C., Socio-Economic Status and Urbanization

- are Linked to Snacks and Obesity in Adolescents in Botswana, *Public Health Nutrition* **14**(2011)12, s. 2260-2267.
41. Jackson, P. ja Viehoff, V., Reframing Convenience Food, *Appetite* **98**(2016)C, s. 1-11.
42. Anonyymi, *Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot [verkkajulkaisu]. Liitetaulukko 1. Asuntokunnat koon mukaan ja asuntokuntien keskikoko 1960–2016.* Helsinki, Tilastokeskus, 2016.
43. Prättälä, R., Sippola, R., Lahti-Koski, M., Laaksonen, M., Mäkinen, T. ja Roos, E., Twenty-Five Year Trends in Body Mass Index by Education and Income in Finland, *BMC Public Health* **12**(2012) s. 936.
44. Kahma, N., Mäkelä, J., Niva, M., Ganskau, E. ja Minina, V., Convenience Food Consumption in the Nordic Countries and St. Petersburg Area, *International Journal of Consumer Studies* **40**(2016)4, s. 492-500.
45. Pärna, K. ja Ringmets, I., Comparison of Socioeconomic Differences in Self-Perceived Health in Estonia and Finland, *Scandinavian Journal of Public Health* **38**(2010)2, s. 129-134.
46. Anonyymi, Amazon mullistamaan Suomen ruokakauppaa? Kauppias: “2–4 vuoden kuluttua he ovat täällä”, [viitattu 12.7.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<https://yle.fi/uutiset/3-10144760>].
47. Anonyymi, *Teollisuusautomaation tietoturva - Verkottumisen riskit ja niiden hallinta*, Helsinki, Suomen Automaatioseura ry, 2010 [viitattu 24.7.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/tietoturva/TeollisuusautomaationTietoturva.pdf>].

48. Ghaani, M., A. Cozzolino, C., Castelli, G. ja Farris, S., An Overview of the Intelligent Packaging Technologies in the Food Sector, *Trends in Food Science & Technology* **51**(2016) s. 1-11.
49. Wyser, Y., Adams, M., Avella, M., Carlander, D., Garcia, L., Pieper, G., Rennen, M., Schuermans, J. ja Weiss, J., Outlook and Challenges of Nanotechnologies for Food Packaging, *Packaging Technology & Science* **29**(2016)12, s. 615-648.
50. Ziccardi, L. M., Edgington, A., Hentz, K., Kulacki, K. J. ja Kane Driscoll, S., Microplastics as Vectors for Bioaccumulation of Hydrophobic Organic Chemicals in the Marine Environment: A State-of-the-Science Review, *Environmental Toxicology and Chemistry* **35**(2016)7, s. 1667-1676.
51. Crawford, C. B. ja Quinn, B., *Microplastic Pollutants*, Elsevier, Amsterdam 2017.
52. Geyer, R., Jambeck, J. ja Law, K., Production, use, and Fate of all Plastics Ever Made, *Science Advances* **3**(2017) s. 1-5.
53. Anonyymi, Energiatuotteiden ulkomaankauppa, [viitattu 23.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa:
[\[http://tulli.fi/documents/2912305/3436465/Energiatuotteiden+ulkomaankauppa/8559bd7e-bc46-43f9-81dc-35c1518eef14?version=1.1#page=7&zoom=auto,-27,605\]](http://tulli.fi/documents/2912305/3436465/Energiatuotteiden+ulkomaankauppa/8559bd7e-bc46-43f9-81dc-35c1518eef14?version=1.1#page=7&zoom=auto,-27,605).
54. Anonyymi, Ukrainan tilanne: pakotteet - Ulkoasiainministeriö: Ajankohtaista, [viitattu 23.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [\[https://um.fi/pakotteet-maittain/-/asset_publisher/4MioQZzZJNV0/content/ukrainan-tilanne-pakotteet/385142?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_redirect=https%3A%2F%2Fum.fi%2Fpakotteet-maittain%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_cur%3D0%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_assetEntryId%3D434489&curAsset=0&stId=47307\]](https://um.fi/pakotteet-maittain/-/asset_publisher/4MioQZzZJNV0/content/ukrainan-tilanne-pakotteet/385142?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_redirect=https%3A%2F%2Fum.fi%2Fpakotteet-maittain%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_cur%3D0%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_4MioQZzZJNV0_assetEntryId%3D434489&curAsset=0&stId=47307).

55. Anonyymi, Our Common Future: From One Earth to One World - A/42/427 Annex, Overview - UN Documents: Gathering a body of global agreements, [viitattu 23.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm#1.2>].
56. Zhu, H., Parvinian, S., Preston, C., Vaaland, O., Ruan, Z. ja Hu, L., Transparent Nanopaper with Tailored Optical Properties, *Nanoscale* **5**(2013)9, s. 3787-3792.
57. Barbash, V. ja Yaschenko, O., V. ja Alushkin, S., V. ja Kondratyuk, A., S. ja Posudievsky, O. ja Koshechko, V., G., *Effect of Mechanochemical Treatment of Cellulose on Characteristics of Nanocellulose Films*, Springer, Cham. 513-521.
58. Le, D., Kongparakul, S., Samart, C., Phanthong, P., Karnjanakom, S., Abudula, A. ja Guan, G., Preparing Hydrophobic Nanocellulose-Silica Film by a Facile One-Pot Method, *Carbohydrate Polymers* **153**(2016) s. 266-274.
59. Antikainen, R., *Elinkaarimetodiikkujen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet*, Suomen ympäristökeskus, 2010.
60. Curran, M. A., *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*, Wiley, Salem, Massachusetts 2012.
61. Hunt, R., LCA — how it Came About, *The International Journal of Life Cycle Assessment* **1**(1996)1, s. 4-7.
62. Klöpffer, W. ja Grahl, B., *Life Cycle Assessment (LCA) : A Guide to Best Practice*, John Wiley & Sons, Incorporated, Weinheim 2014.
63. Anonyymi, ILCD Handbook – EPLCA, [viitattu 11.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86].
64. Finnveden, G., Valuation Methods within LCA - Where are the Values? *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2**(1997)3, s. 163-169.

65. Heijungs, R., Numerical Approaches Towards Life Cycle Interpretation Five Examples, *The International Journal of Life Cycle Assessment* **6**(2001)3, s. 141-148.
66. Huijbregts, M. A. J., *Uncertainty and Variability in Environmental Life-Cycle Assessment*, University of Amsterdam, 2001, 190 s.
67. Heijungs, R., Identification of Key Issues for further Investigation in Improving the Reliability of Life-Cycle Assessments, *Journal of Cleaner Production* **4**(1996)3, s. 159-166.
68. Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. ja Suh, S., Recent Developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management* **91**(2009)1, s. 1-21.
69. Mengel, M., Nauels, A., Rogelj, J. ja Schleussner, C., Committed Sea-Level Rise Under the Paris Agreement and the Legacy of Delayed Mitigation Action, *Nature Communications* **9**(2018)1, s. 1-10.
70. Schleussner, C., Rogelj, J., Schaeffer, M., Lissner, T., Licker, R., Fischer, E., Knutti, R., Levermann, A., Frieler, K. ja Hare, B., Science and Policy Characteristics of the Paris Agreement Temperature Goal, *Nature Climate Change* **6**(2016)9, s. 1-9.
71. Lloyd, S. M. ja Ries, R., Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches, *Journal of Industrial Ecology* **11**(2007)1, s. 161-179.
72. Spielmann, M., Scholz, R., Tietje, O. ja de Haan, P., Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis, *The International Journal of Life Cycle Assessment* **10**(2005)5, s. 325-335.
73. Hervy, M., Evangelisti, S., Lettieri, P. ja Lee, K., Life Cycle Assessment of Nanocellulose-Reinforced Advanced Fibre Composites, *Composites Science and Technology* **118**(2015) s. 154-162.

74. Broeren, M. L. M., Kuling, L., Worrell, E. ja Shen, L., Environmental Impact Assessment of Six Starch Plastics Focusing on Wastewater-Derived Starch and Additives, *Resources, Conservation and Recycling* **127**(2017) s. 246-255.
75. Vink, E. T. H., Davies, S. ja Kolstad, J., The Eco-Profile for Current Ingeo[R] Polylactide Production, *Industrial Biotechnology* **6**(2010)4, s. 212.
76. Hohenthal, C., Ovaskainen, M., Bussini, D., Sadocco, P., Pajula, T., Lehtinen, H., Kautto, J. ja Salmenkivi, K., *Final assessment of nano enhanced new products*, 2012.
77. Li, Q., McGinnis, S., Wong, A., Sydnor, C. ja Renneckar, S., Nanocellulose Life Cycle Assessment, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* **1**(2013)8, s. 919-928.
78. Anonymi, Eco-indicator 99 Manuals, [viitattu 21.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa: [<https://www.pre-sustainability.com/news/eco-indicator-99-manuals>].
79. Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S. ja Som, C., Predicting the Environmental Impact of a Future Nanocellulose Production at Industrial Scale: Application of the Life Cycle Assessment Scale-Up Framework, *Journal of Cleaner Production* **174**(2018) s. 283-295.
80. Arvidsson, R., Ngyen, D. ja Svanström, M., Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibrils Production by Mechanical Treatment and Two Different Pretreatment Processes, *Environmental Science & Technology* **49**(2015)11, s. 6881-6890.
81. Nascimento, D. M. D., Ferreira Dias, A., Pires, C., Rosa, M., Paulo, J., Saraiva Morais, J. P. ja Figueirêdo, M., A Comprehensive Approach for Obtaining Cellulose Nanocrystal from Coconut Fiber. Part II: Environmental Assessment of Technological Pathways, *Industrial Crops & Products* **93**(2016) s. 58-65.
82. Nascimento, D. M. d., Almeida, J., Vale, S., Leitão, R., Muniz, C., Figueirêdo, M., Saraiva Morais, J. P. ja Rosa, M., A Comprehensive Approach for Obtaining Cellulose

- Nanocrystal from Coconut Fiber. Part I: Proposition of Technological Pathways, *Industrial Crops & Products* **93**(2016) s. 66-75.
83. Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S. ja Som, C., From Laboratory to Industrial Scale: A Scale-Up Framework for Chemical Processes in Life Cycle Assessment Studies, *Journal of Cleaner Production* **135**(2016) s. 1085-1097.
84. Curtis, F., Peak Globalization: Climate Change, Oil Depletion and Global Trade, *Ecological Economics* **69**(2009)2, s. 427-434.
85. Anonyymi, *Ruoka2030 -ruokapoliittinen selonteko*, 2017 [viitattu 29.8.2018] Saatavilla WWW-muodossa:
[<https://mmm.fi/documents/1410837/1923148/Ruokapoliittinen+selonteko+Ruoka2030/d576b315-41fe-4e9d-9d02-8462c5ae5895/Ruokapoliittinen+selonteko+Ruoka2030.pdf>].
86. Siegrist, M., Cousin, M., Kastenholz, H. ja Wiek, A., Public Acceptance of Nanotechnology Foods and Food Packaging: The Influence of Affect and Trust, *Appetite* **49**(2007)2, s. 459-466.
87. Currall, S., King, E., Lane, N., Madera, J. ja Turner, S., What Drives Public Acceptance of Nanotechnology? *Nature Nanotechnology* **1**(2006) s. 153-155.
88. Alexandrescu, L., Syverud, K., Gatti, A. ja Chinga-Carrasco, G., Cytotoxicity Tests of Cellulose Nanofibril-Based Structures, *Cellulose* **20**(2013)4, s. 1765-1775.
89. Vartiainen, J., Pöhler, T., Sirola, K., Pylkkanen, L., Alenius, H., Hokkinen, J., Tapper, U., Lahtinen, P., Kapanen, A., Putkisto, K., Hiekkataipale, P., Eronen, P., Ruokolainen, J. ja Laukkanen, A., Health and Environmental Safety Aspects of Friction Grinding and Spray Drying of Microfibrillated Cellulose, **18**(2011).
90. Yanamala, N., Farcas, M., K. Hatfield, M., Kisin, E., Kagan, V., L. Geraci, C. ja Shvedova, A., In Vivo Evaluation of the Pulmonary Toxicity of Cellulose

Nanocrystals: A Renewable and Sustainable Nanomaterial of the Future, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2**(2014)7, s. 1691.